ASTRONOMÍA
El universo en luz y ondas gravitatorias

SOSTENIBILIDAD
Minería en el fondo del océano

BIODIVERSIDAD
La paradoja de la conservación

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Julio 2018 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

LA CONQUISTA DE LOS DINOSAURIOS

Nuevos fósiles revelan que estuvieron relegados a unas pocas zonas durante millones de años antes de ocupar toda la Tierra

ENFERMEDADES EMERGENTES EN UN MUNDO CAMBIANTE

INFORME ESPECIAL
EL FUTURO DE LA MEDICINA 2018



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

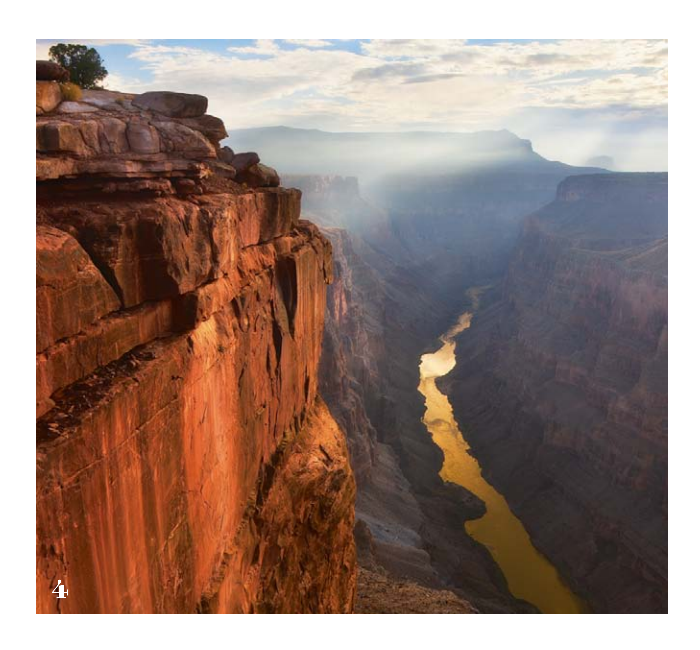
EL ORIGEN DE LOS DINOSAURIOS | ASTRONOMÍA DE MULTIMENSAJEROS | ENFERMEDADES EMERGENTES

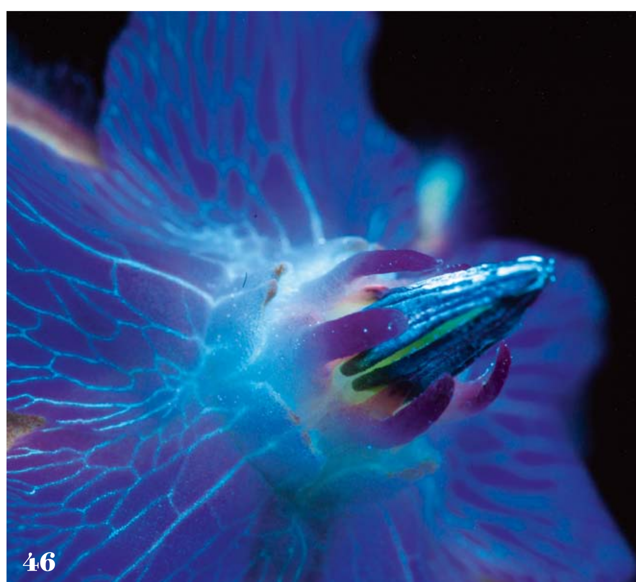
JULIO 2018 N.° 502

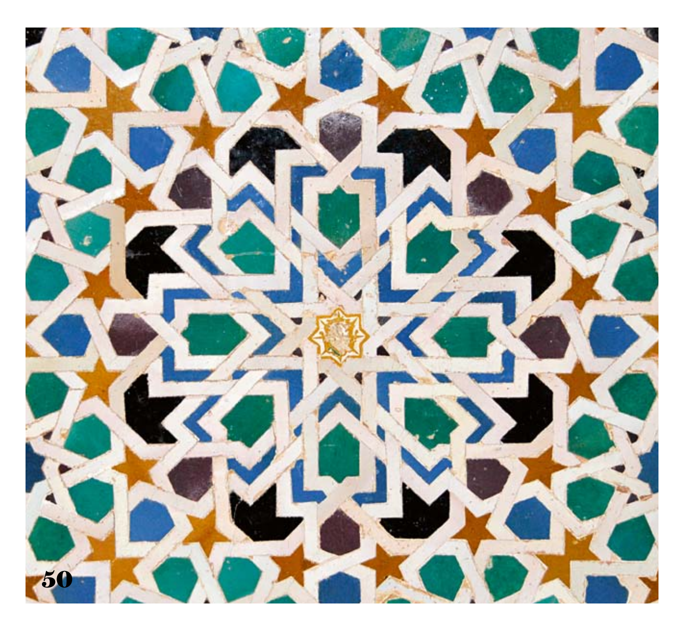


ARTÍCULOS

FOTOGRAFÍA DE BRETT STEVENS


4


46


50

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Prorotodactylus, un protodinosaurio del tamaño de un gato doméstico, irrumpe en el escenario mundial en esta representación artística. El animal es conocido por sus huellas fosilizadas descubiertas en la sierra de Santa Cruz, en Polonia. Este y otros hallazgos apuntan a que los dinosaurios tuvieron un escasa presencia durante decenas de millones de años, antes de conquistar el planeta. Ilustración de James Gurney



redaccion@investigacionyciencia.es



Enero y marzo de 2018

MEDIR LA CONSCIENCIA

El artículo de Christof Koch «¿Es mensurable la consciencia?» [Investigación y Ciencia, enero de 2018] presenta una técnica que pretende deducir si un paciente con lesiones cerebrales graves se halla consciente o no. Dicha técnica consiste en enviar pulsos magnéticos al cerebro, cuantificar su actividad eléctrica y generar una medida matemática de la capacidad de respuesta llamada «índice de complejidad de perturbación» (ICP).

El artículo resulta problemático en varios aspectos. Koch argumenta que determinados pacientes, a pesar de presentar daño cerebral y no responder, debían conservar algo parecido a la consciencia ya que su ICP superaba un umbral que los investigadores habían establecido en sujetos conscientes. Esa misma categoría incluía a personas en fase de sueño REM, a quienes la infografía que acompaña al artículo califica como «sin respuesta, conscientes». Sin embargo, si la consciencia se define como la capacidad para reconocer la realidad, toda equiparación entre una actividad neuronal y la consciencia debería requerir alguna prueba de que dicha actividad emerge como respuesta a un estímulo sensorial. Solo si aparecieran datos que demostrasen que los pacientes mencionados presentan un pronóstico mejor que el de otros sujetos comatosos podría el ICP usarse como un indicador útil para médicos y familias.

Por otro lado, Koch califica de manera completamente errónea la causa de la muerte de Terri Schiavo cuando afirma que esta fue «inducida médicamente». En realidad, Schiavo fue mantenida con vida durante años gracias a una intervención médica, y murió cuando dicha intervención se suspendió y su cuerpo siguió las consecuencias naturales que se derivan de un daño cerebral grave. Es decir, su muerte fue retrasada por el tratamiento médico, no causada por él.

David Herbert
Asociación Sutter de Médicos Independientes
Sacramento

DIVISA POLÍTICA

En el artículo «Hacer saltar la banca» [Investigación y Ciencia, marzo de 2018], Alexander Lipton y Alex Pentland argumentan que, bien usadas, las criptomonedas podrían conseguir un sistema financiero global más transparente, responsable y equitativo. Tanto su artículo como los otros dos que acompañan el informe sobre el futuro del dinero parecen obviar todo lo relacionado con la creación y la distribución de riqueza real: la producción de bienes y servicios valiosos para las personas, de los cuales una moneda no es sino el medio de intercambio.

Hoy en día, un porcentaje excesivo de las ganancias corporativas proviene de las finanzas. Las criptomonedas parecen ser ajenas a los problemas de la riqueza real y, en su lugar, se asemejan a un juego de ordenador hecho para que los ricos especulen. Las monedas tienen el valor que la gente les da. Cuando se distancian de la economía real, incentivan la explotación y la corrupción de aquellos encargados de preservar la integridad del mismo sistema que ocupó un papel clave en la crisis de las hipotecas basura.

Es difícil ver por qué las criptomonedas iban a conseguir una economía más igualitaria. Lo que necesitamos es un mayor control social de la inversión por parte de todos los interesados y una distribución menos desequilibrada de las ganancias.

Stanley Hirtle
Dayton, Ohio

Aunque Lipton y Pentland aclaran el funcionamiento de las criptodivisas, caen en algunas distorsiones en otros ámbitos. Al describir el comienzo de los bancos centrales en la Europa del siglo xvii, afirman que los reyes «devolvían habitualmente los préstamos [pedidos a los comerciantes para combatir en guerras] gracias a los impuestos con que gravaban las ganancias». Sin embargo, este tipo de préstamos también se pagaban gracias al saqueo de otras naciones conquistadas durante la guerra. La explotación de los países sometidos fue, y sigue siendo, una fuente de ingresos para las naciones imperialistas.

El artículo aborda la indeseable concentración de la riqueza en pocas manos, pero lo atribuye a «paradigmas obsoletos» y describe la crisis de 2008 como causada por «una insuficiente capacidad burocrática para atender las pérdidas individuales de decenas de millones de ciudadanos». Sin regulaciones estrictas, dudo que ningún sistema financiero sea capaz de frenar la avaricia que está aumentando la brecha entre ricos y pobres y agravando el calentamiento global. Creo que el interés en rescatar a la industria financiera en 2008 se debió a la enorme influencia que esta tenía sobre los Gobiernos de Bush y Obama. Solucionar este problema exigirá leyes que prohíban las puertas giratorias entre las finanzas y la política y una mayor recaudación impositiva.

Julian Weissglass
Profesor emérito de la Universidad de California en Santa Barbara

Erratum corrige

En el artículo **El impulso nervioso, reimaginado** [por Douglas Fox; Investigación y Ciencia, junio de 2018] se afirmaba erróneamente que los primeros experimentos con electrodos en neuronas se llevaron a cabo hacia 1915. La fecha correcta es hacia mediados del siglo xx.

Este error ha sido corregido en la versión digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LAS ROCAS SEDIMENTARIAS, como las del Gran Cañón del Colorado, contienen niveles sorprendentemente elevados de nitrógeno.

PAUL ROJAS/GETTY IMAGES

GEOQUÍMICA

El nitrógeno oculto en las rocas

Bajo nuestros pies yace una fuente previamente desconocida de este elemento esencial para las plantas

Hasta ahora se pensaba que casi todo el nitrógeno presente en el suelo provenía de la atmósfera, desde donde era capturado por microorganismos o disuelto en la lluvia. Sin embargo, parece que los científicos han estado pasando por alto otra fuente de gran importancia de este elemento, esencial para el crecimiento de las plantas. Según un estudio publicado el pasado abril en la revista *Science*, hasta una cuarta parte del nitrógeno del suelo y las plantas se filtraría desde la tierra a través del lecho rocoso.

Al margen de unos pocos estudios aislados, la comunidad investigadora nunca había pensado en estudiar las rocas como posible fuente de nitrógeno, afirma Benjamin Z. Houlton, experto en ecología global de la Universidad de California en Davis y autor principal del estudio. Pero el hallazgo tiene implicaciones que van más allá de la comprensión del ciclo del nitrógeno en nuestro planeta, ya que podría obligar a modificar los modelos climáticos. En ciertas áreas, las plantas estarían capacitadas para crecer más y más rápido de lo que se pensaba, lo que les permitiría absorber una mayor cantidad de dióxido de carbono, explica Houlton.

A medida que aumentan las temperaturas globales, cada vez es más importante calcular cuánto dióxido de carbono será capaz de absorber la vegetación. La cantidad exacta sigue siendo desconocida, pero las plantas quizá puedan proporcionar «algo más de margen», señala Houlton.



LOS BOSQUES DE SECUOYAS crecen sobre tierras y rocas ricas en nitrógeno, lo que en parte explica el enorme tamaño de estos árboles.

Las investigaciones anteriores habían examinado la relación entre la cantidad de nitrógeno presente en los sedimentos que pasa al manto (la capa que hay bajo la corteza terrestre) y la cantidad que liberan los volcanes a la atmósfera (compuesta en un 78 por ciento de nitrógeno). Desde los años setenta del siglo pasado, algunos estudios venían mostrando que varios tipos de rocas sedimentarias contenían nitrógeno procedente de plantas, algas y animales que murieron hace largo tiempo y que se depositaron en el antiguo fondo marino. Algunos artículos incluso propusieron que el elemento podría filtrarse al suelo en determinados lugares. Sin embargo, nadie continuó investigando y los científicos acabaron por concluir que la cantidad de nitrógeno liberado por la erosión de las rocas sería insignificante. «No parecía que fuese a formar parte del paradigma de cómo creemos que funciona el ciclo del nitrógeno», apunta Houlton.

En 2011, en un estudio publicado en *Nature*, Houlton y sus colaboradores descubrieron que los suelos forestales situados sobre rocas sedimentarias de ciertas partes de California contenían un 50 por ciento más de nitrógeno que los emplazados sobre rocas ígneas (volcánicas). También hallaron un 42 por ciento más de nitrógeno en los árboles que crecían sobre un lecho de roca sedimentaria. Sin embargo, aunque aquella investigación indicó que el elemento pasaba de las rocas al suelo y las plantas en zonas concretas, no demostró que se tratase de un fenómeno de importancia mundial.

En el nuevo estudio, Houlton y sus colaboradores usaron California como sistema geológico modelo, ya que esta región estadounidense posee la mayoría de los tipos de roca existentes en la Tierra. Los investigadores midieron los niveles de nitrógeno en casi mil muestras californianas y en otras de todo el mundo. Luego desarrollaron un modelo informático para calcular la rapidez con que las rocas terrestres se descomponen y aportan nitrógeno al suelo.

El nitrógeno liberado por los procesos de meteorización acaba llegando al océano y se deposita en las rocas que se están formando en el fondo marino. Después, el movimiento de las placas tectónicas eleva las rocas; estas se degradan y dejan escapar el nitrógeno, que es absorbido por las plantas y los animales y atrapado de nuevo en las rocas, con lo que se perpetúa el ciclo. La meteorización puede consistir tanto en una desintegración física —que se acelera cuando las rocas son empujadas hacia arriba y quedan expuestas a los elementos— como en una disolución química, como la que se produce cuando el agua de lluvia reacciona con los compuestos de las rocas.

William Schlesinger, biogeoquímico del Instituto Cary de Estudios del Ecosistema en Millbrook que no participó en el estudio, afirma que en una ocasión midió niveles considerables de nitrógeno en las rocas, pero no «ató cabos» y supuso que no sería una fuente habitual o importante del nutriente. Con todo, Schlesinger aconseja tomarse los nuevos hallazgos con cautela, ya que la cantidad de nitrógeno que penetra en el suelo a través de los abonos sintéticos eclipsa la que lo hace desde las rocas [*véase* «El problema global del nitrógeno», por Alan R. Townsend y Robert W. Howarth; Investigación y Ciencia, abril de 2010]. Aunque el investigador piensa que el descubrimiento debería incorporarse a los modelos globales del nitrógeno y el carbono, añade: «No creo que vaya a cambiar nuestra manera de entender el cambio climático».

FEARGUS COONEY/GETTY IMAGES (*secuoyas*); GETTY IMAGES (*bolas*)

PSICOLOGÍA

El origen de la vista de lince

La destreza de una persona para fijarse en los detalles parece emanar de una única facultad perceptiva

Según un nuevo estudio, nuestra aptitud para ver cosas que aparecen fugazmente, en entornos atestados o fuera de nuestro foco de atención estaría determinada por un único rasgo, la «capacidad perceptiva», la cual sería propia de cada persona. Los investigadores afirman que, en un futuro, el hallazgo podría ayudar a predecir científicamente el rendimiento de un individuo en trabajos que requieran una gran capacidad de observación.

Joshua Eayrs y Nilli Lavie, psicólogos del Colegio Universitario de Londres, propusieron a un grupo de participantes una serie de tareas visuales. Una de ellas medía su pericia a la hora de calcular el número de objetos que aparecían en una pantalla durante una décima de segundo, una habilidad conocida como «subitización». Otras evaluaban la facultad para percibir pequeñas diferencias entre dos escenas del mundo real; para detectar un cambio que se produce en el borde de la pantalla mientras uno se está fijando en el centro; así como para seguir varios puntos que se mueven entre otros que permanecen estáticos.

Según el artículo que describe los resultados, publicado el pasado mes de marzo en *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, aquellos sujetos que destacaban en la subitización tendían a realizar mejor las demás tareas. «Se trata del primer estudio que establece el rasgo de la capacidad perceptiva», explica Lavie. «Es una habilidad importante que [determina] cuánta información podemos procesar cuando hay mucha a nuestro alrededor.»

En teoría, el rendimiento en cualquier tarea —no solo las estudiadas— que dependa de la capacidad perceptiva podría servir para predecir el rendimiento en cualquier otra. El



La comunidad investigadora nunca había pensado en estudiar las rocas como posible fuente de nitrógeno

No obstante, los hallazgos sí explican los niveles de nitrógeno sorprendentemente altos observados en algunos suelos. «Nuestro estudio permite entender la diferencia entre lo que indicaban las observaciones y lo que predecían los modelos», asegura Houlton. Los resultados son especialmente importantes a la hora de considerar los enormes bosques ricos en nitrógeno de Canadá y Rusia, muchos de los cuales se encuentran sobre formaciones sedimentarias.

Houlton afirma que el nuevo estudio se basó en mediciones bastante prudentes del nitrógeno de las rocas, y que es probable que la cantidad real sea mayor que la calculada por su equipo. «No cabe duda de que la erosión ha aumentado de manera drástica a causa del ser humano», añade. Ello incrementaría la cantidad de nitrógeno liberada a través de la meteorización, «y eso es algo que no hemos tenido en cuenta en nuestro estudio», concluye el investigador.

—Doug Main

equipo de Lavie también demostró que la capacidad perceptiva es diferente de la capacidad cognitiva general, y descartó otros factores que pudieran explicar los resultados, como distintos niveles de motivación.

Aunque interesantes y plausibles, los hallazgos son también preliminares y deberán ser replicados de manera independiente en muestras más grandes, advierte Matt Meier, psicólogo de la Universidad de Carolina Occidental que no participó en el estudio.

Los autores creen que su hallazgo podría ayudar a desarrollar pruebas de selección para aquellos puestos de seguridad que tienen lugar en entornos visuales exigentes, como ocurre con los controladores aéreos, los vigilantes de seguridad o el personal militar. Lavie explica que su equipo ya está investigando si medir la capacidad perceptiva podría usarse para predecir el rendimiento real en dichas tareas.

—Simon Makin

CONSERVACIÓN

La pesca con bombas

Una técnica que localiza la procedencia de disparos detecta una práctica de pesca devastadora

Los pescadores sin escrúpulos de muchas partes del globo arrojan explosivos al mar para recoger a manos llenas los peces aturdidos o muertos. Esta práctica, ilegal en numerosos países, destruye los arrecifes coralinos y causa estragos en la diversidad marina. Atrapar a los delincuentes en la inmensidad de la mar resulta casi imposible, pero un grupo de investigadores que trabaja en Malasia ha modificado sensores acústicos —destinados originalmente a localizar la procedencia de los disparos de armas de fuego en entornos urbanos— para que localicen con precisión las detonaciones marinas en un radio de decenas de metros.

El crecimiento de la población mundial y la demanda internacional de pescado empuja a los pescadores a aumentar sus capturas. La pesca con explosivos, que no solo se practica en Malasia, sino en Nicaragua, Tanzania y otros lugares, es un modo «brutalmente eficaz», asegura George Woodman, fundador de la organización conservacionista Teng Hoi, con sede en Hong Kong. La onda expansiva generada por la explosión revienta la vejiga natatoria de los peces, que quedan inmovilizados y afloran inermes a la superficie. La fabricación de los artefactos no entraña dificultades: basta con mezclar nitrato de amonio (un fertilizante corriente) con gasóleo en una botella vacía y cerrarla con un detonador y una mecha resistente al agua, explica Woodman.

Él y sus colaboradores detonaron 19 bombas en una bahía arrasada y virtualmente desprovista de vida en Sabah, estado del este de Malasia. Registraron los sonidos de las explosiones con sensores diseñados por ShotSpotter, una empresa de California que emplea una técnica similar para localizar la procedencia de disparos de armas en las ciudades. El equipo usó los datos cronometrados que registraron cuatro aparatos montados en muelles y dos instalados en embarcaciones para triangular las posiciones de 16 explosiones en un radio de 60 metros en unos 10 segundos. Asimismo, localizaron explosiones incontroladas provocadas por los pescadores locales y fotografiaron las barcas situadas en las cercanías de las mismas, según relataron el pasado marzo en *Marine Pollution Bulletin*.

Esas demostraciones —es la primera vez que se consigue localizar con precisión las explosiones de ese modo— son un paso importante para perseguir el delito, asegura el equipo, porque permite vincular la detonación con una embarcación en el espacio y el tiempo.

Pero la erradicación de la pesca con explosivos exigirá algo más que la persecución de los infractores, advierte Elizabeth Wood, bióloga marina que desempeña su labor en Sabah y que no ha formado parte del nuevo estudio. «Es esencial que las comunidades de pescadores locales reconozcan las ventajas inmediatas y a largo plazo de la pesca sostenible», asegura. Las autoridades malayas apuestan por una iniciativa que promueva la piscicultura, comenta Ming Yuk Pang, ministro adjunto de turismo, cultura y ambiente de Sabah y presidente del comité local contra la pesca con explosivos: «Queremos explicarles que hay mejores formas de ganarse la vida».

—Katherine Kornei



1



2

DEVASTACIÓN sufrida por los corales (*1*) a causa de la pesca con explosivos, práctica que muestra la fotografía inferior (*2*).

BOB HALSTEAD/GETTY IMAGES (1); ALAMY (2)

EVOLUCIÓN

¿Azul o rosa?

Las ventas de mochilas parecen indicar que las familias acomodadas invierten más en sus hijos varones, mientras que las pobres lo harían en sus hijas



Según los biólogos evolutivos, hay situaciones en las que los progenitores tienden a favorecer a la descendencia de un determinado sexo. Ahora, un nuevo estudio ha analizado las ventas de mochilas de colores y sugiere que, en familias con una buena situación económica, los padres podrían invertir más en los hijos que en las hijas, mientras que en las familias más modestas sucedería a la inversa.

En 1973, el biólogo Robert Trivers y el informático Dan Willard publicaron un artículo en el que proponían que los progenitores invierten más recursos, como comida y esfuerzo, en la descendencia masculina cuando las cosas van bien y en la femenina en tiempos más desfavorables. De acuerdo con la hipótesis de Trivers y Willard, un hijo que recibe muchos bienes podrá superar a otros a la hora de conseguir pareja; en cambio, los progenitores con menos recursos tenderán a invertirlos en las hijas, a las que por lo general les resultará más fácil atraer a congéneres para procrear. Trivers y Willard postularon, además, que las circunstancias de los padres podrían incluso influir en la proporción de sexos de los descendientes, una idea ampliamente respaldada por investigaciones realizadas en otras especies.

Sin embargo, estudiar cuánto invierten los padres en sus hijos tras el nacimiento resulta difícil y ha arrojado resultados contradictorios. Por esa razón, el nuevo estudio buscó un indicador de dicha inversión que cumpliera varios requisitos: debía ser inmune a las diferencias en la necesidad de recursos que son inherentes a cada sexo; debía medir la inversión, no los resultados; y debía ser objetivo.

El autor del estudio, Shige Song, sociólogo del Queens College de la Universidad de la Ciudad de Nueva York, examinó el gasto en las mochilas de color rosa y azul vendidas en China en 2015 por una gran plataforma de comercio electrónico, JD.com. Song redujo los datos a unas 5000 mochilas: las mochilas azules compradas por familias en las que se sabía que había al menos un niño, y las mochilas rosas compradas por familias en las que se sabía que había al menos una niña. Los resultados mostraron que las familias más acomodadas gastaron más en mochilas azules, lo que parecía indicar una mayor inversión en los hijos varones. En cambio, las familias más pobres gastaron más en mochilas de color rosa. Los hallazgos se publicaron en febrero en la edición en línea de *Evolution and Human Behavior*.

Las pruebas de la hipótesis de Trivers y Willard que aporta Song son «indirectas» pero «bastante convincentes», apunta Rosemary Hopcroft, socióloga de la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte que no participó en el estudio. En 2016, Hopcroft publicó que los padres estadounidenses con profesiones de prestigio mostraban una mayor tendencia a enviar a una escuela privada a sus hijos que a sus hijas, mientras que los progenitores con empleos de menor nivel inscribían con mayor frecuencia a las niñas. Aunque el nuevo estudio no demuestra que las familias compraran las mochilas azules para los niños y las rosas para las niñas, Hopcroft concluye que «se trata de un artículo inteligente, interesante y que utiliza los macrodatos de manera muy novedosa».

—Matthew Hutson

BIOLOGÍA SINTÉTICA

Misterio microbiano

Un microorganismo genomodificado aporta pistas sobre los orígenes de las arqueas y las bacterias

Según la teoría de la evolución, hace miles de millones de años el ancestro unicelular de todas las formas de vida terrestres se escindió en el linaje de las bacterias y el de las arqueobacterias. Ahora se ha modificado genéticamente un microbio que aúna rasgos de ambos dominios y que ofrece nuevas perspectivas sobre cómo pudo acaecer ese acontecimiento capital.

Las bacterias y las arqueobacterias son microorganismos unicelulares carentes de núcleo, pero dotados de una genética y bioquímica distintas. Por ejemplo, su membrana celular está compuesta por tipos distintos de moléculas grasas, o lípidos. Una hipótesis consolidada acerca de la separación de ambos dominios sostiene que la membrana del ancestro común contenía ambos lípidos, lo que la hacía inestable y quizás excesivamente permeable y, por ende, poco favorable desde el punto de vista evolutivo.



Microbiólogos holandeses decidieron poner a prueba esa idea recreando un microorganismo primitivo provisto de una membrana lipídica híbrida. Primero introdujeron los genes de los lípidos arqueanos en bacterias *Escherichia coli* y, a continuación, modificaron su metabolismo con el fin de fomentar la producción de las moléculas precursoras de tales lípidos. La cepa resultante de *E. coli* mostró una membrana celular que contenía hasta un 30 por ciento de lípidos arqueanos y un 70 por ciento de bacterianos, según comunicaron sus artífices el pasado abril en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

Para sorpresa del equipo, las nuevas células crecieron sin problemas y la membrana mixta permaneció estable. «Este hecho apunta a otras causas históricas sobre la separación de las arqueas y las bacterias», afirma Eugene Koonin, biólogo evolutivo y computacional de los Institutos Nacionales de Salud y encargado de editar el artículo antes de su publicación.

Uno de los autores del estudio, Arnold Driessen, de la Universidad de Groninga, aboga por una alternativa: tal vez no existiera un único ancestro común, «sino una amalgama de múltiples formas de vida». Otra hipótesis más extraña, afirma, es que el ancestro no poseyera membrana, sino que fuera una suerte de «masa líquida protegida por partículas de arcilla».

—Prachi Patel

THOMAS FUCHS *(ilustración)*; STEVE GSCHMEISSNER/GETTY IMAGES *(bacterias)*

PSIQUIATRÍA

Enfermedades mentales con lazos comunes

Un conjunto distintivo de genes podría estar implicado en varios trastornos psiquiátricos

Las personas que padecen autismo, esquizofrenia o trastorno bipolar afrontan problemas distintos, pero todas esas enfermedades podrían tener su origen en un mismo grupo de genes. Esta es la conclusión a la que se ha llegado tras comparar los análisis genéticos de 700 cerebros de fallecidos que habían sufrido alguno de los tres trastornos, además de alcoholismo y depresión mayor (*columnas*) con los de otras personas que no los habían padecido. Se examinaron 13 grupos de genes que se cree que actúan conjuntamente (*filas*). Así se descubrieron cinco grupos que presentan un patrón de sobreactividad o infraactividad en al menos tres de los cinco trastornos (*recuadros azules y grises*). El trastorno bipolar, por ejemplo, resultó más similar a la esquizofrenia que a la depresión mayor, aunque los médicos vinculan la bipolaridad con la depresión, a tenor de sus síntomas. Estos datos podrían revelar nuevos tratamientos, afirma el coautor Daniel Geschwind, neurogenetista de la Universidad de California en Los Ángeles. Añade que uno de los siguientes pasos consistiría en «colocar esos grupos de genes en placas de laboratorio y comprobar qué fármacos revierten su sobreexpresión o infraexpresión».

—Mark Fischetti

Genes sobreactivados
Uno de los grupos de genes prevalentes en el astrocito, un tipo de célula cerebral, aparece sobreactivado en el autismo, la esquizofrenia y el trastorno bipolar.

Patrón común
Tres grupos de genes (B, C y D) localizados en las neuronas permanecen poco activos en el autismo, la esquizofrenia y el trastorno bipolar. Pero dos de los cuatro muestran una actividad excesiva en el alcoholismo.

Autismo | Esquizofrenia | Trastorno bipolar | Depresión mayor | Alcoholismo

El grupo A engloba genes que son activos en los astrocitos

A

Los grupos B, C, D y E comprenden genes que son activos en las neuronas

B

EPHB6
SCAMP5
ARHGDIG
CAMK2B
SYP

Genes activos: El grupo B contiene 1106 genes; se muestran cinco a título de ejemplo

C

D

E

El grupo F contiene genes que son activos en los microgliocitos

F

El grupo G engloba genes que son activos en las células endoteliales

G

H

I

J

K

L

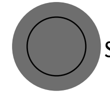
M

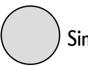
Alcoholismo
El patrón de actividad génica del alcoholismo es muy distinto del patrón de los demás trastornos.

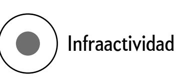
Cómo interpretar el gráfico

Cada columna representa un trastorno psiquiátrico. Cada fila constituye un grupo de genes que suelen actuar conjuntamente en el cerebro.

El diámetro del círculo coloreado indica el nivel de expresión génica en comparación con los cerebros que no sufren el trastorno.


Sobreactividad

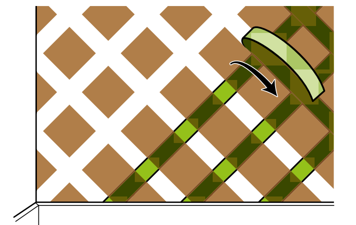

Similar


Infraactividad

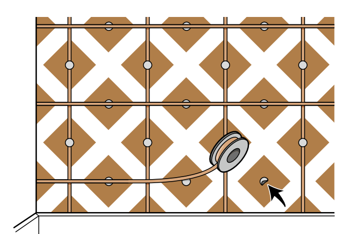
Grupos de genes: Ciertos genes del cerebro suelen operar como una unidad y devienen más o menos activos en ciertos tipos de células cerebrales, como los astrocitos, las neuronas, los microgliocitos o las células endoteliales. Los investigadores descubrieron 13 grupos (*filas A-M*). Cada uno podría albergar entre 100 y 1100 genes. Los grupos de las filas H-M no muestran preferencia por ningún tipo celular.

FUENTE: «SHARED MOLECULAR NEUROPATHOLOGY ACROSS MAJOR PSYCHIATRIC DISORDERS PARALLELS POLYGENIC OVERLAP», POR MICHAEL J. GANDAL ET AL., EN *SCIENCE*. VOL. 359, 9 DE FEBRERO DE 2018; MARTIN KRZYWINSKI (*gráfico*)

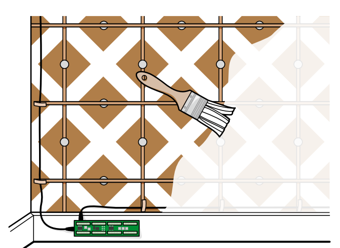
1 Primero, los investigadores cubrieron la pared con un entramado de cinta de embalar y pintaron sobre él con pintura conductora de níquel.



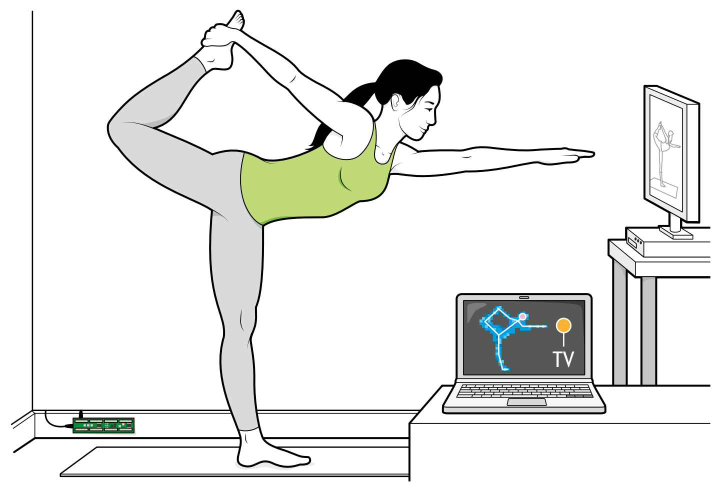
2 Luego retiraron la cinta, dejando atrás un conjunto de electrodos con forma de diamante.



3 Conectaron los diamantes entre sí con una cinta delgada de cobre y colocaron pegatinas circulares de vinilo para aislar algunos de ellos entre sí.



4 Por último, usaron cables para conectar la cinta de cobre a una placa de circuito insertada en la pared y cubrieron esta con pintura normal de látex.



5 En ese momento, la pared ya estaba lista para detectar gestos y aparatos eléctricos cercanos.

TECNOLOGÍA

Paredes inteligentes

Una pintura conductora puede convertir una superficie en un enorme sensor táctil

Una pintura adecuada puede darle dinamismo a nuestras paredes. Ahora, puede hacerlas también más inteligentes. En un trabajo reciente, un grupo de investigadores ha usado pintura conductora de bajo coste para convertir una pared en un enorme panel táctil que también funciona como sensor de movimientos.

Una pared de este tipo es sensible al tacto y puede detectar gestos a distancias cortas, localizar aparatos eléctricos y comprobar si están encendidos. Algún día esta tecnología podría encender las luces cuando una persona entre a una habitación, seguir los movimientos de un jugador en un videojuego interactivo o controlar el uso que hace un niño de la televisión. «Las paredes están por todas partes, así que ¿por qué no convertirlas en sensores para hogares inteligentes?», apunta Yang Zhang, doctorando de informática de la Universidad Carnegie Mellon y uno de los autores del trabajo.

Para crear la superficie de alta tecnología, Zhang y sus colaboradores formaron un entramado de cinta de embalar sobre una pared de 3,7 por 2,4 metros. Luego aplicaron una pintura conductora de níquel disponible en el mercado. Al retirar la cinta, quedó un conjunto de electrodos con forma de diamante, los cuales conectaron mediante una red de cinta delgada de cobre. Después colocaron una pegatina de vinilo en el centro para aislar algunos electrodos entre sí. Por último, usaron cables para conectar las tiras a una placa de circuito personalizada y recubrieron la pared con pintura estándar de látex. Todo el proyecto les llevó cuatro horas y costó menos de 200 dólares (unos 170 euros). En teoría, afirma Zhang, «cualquiera puede usar esta técnica para hacer una pared inteligente».

Al detectar un toque o un gesto, la pared funciona de manera similar a la pantalla de un teléfono. La placa de circuito hace que los electrodos emitan un campo eléctrico. Cuando el cuerpo de una persona intercepta ese campo, provoca un cambio en la corriente que circula por los electrodos cercanos. No obstante, para que todo funcione, el usuario debe estar a menos de un metro de la pared. Los investigadores están trabajando para superar esta limitación.

Cuando la pared se halla en el modo de detección de aparatos eléctricos, se desconecta la alimentación y los electrodos actúan como una antena que capta las ondas electromagnéticas emitidas por los dispositivos cercanos. Los investigadores detectaron iPads situados a distancias de hasta dos metros de la pared, mientras que los ventiladores y las lámparas podían estar a unos tres metros. Zhang y sus colegas de Disney Research presentaron la pared el pasado mes de abril durante la Conferencia sobre Factores Humanos en Sistemas Informáticos, celebrada en Montreal.

Los ingenieros siempre han soñado con tecnologías que se fundan con nuestro entorno, señala Christian Holz, investigador de Microsoft Research que no participó en el trabajo. Un sensor de pared es algo que domina la habitación pero que permanece oculto a la vista. «Cuestiona nuestra concepción de cómo puede ser un dispositivo y demuestra que la tecnología de alta sensibilidad puede integrarse a la perfección con los objetos cotidianos», apunta Holz.

—*Prachi Patel*

FUENTE: «WALL++: ROOM-SCALE INTERACTIVE AND CONTEXT-AWARE SENSING», YANG ZHANG ET AL., PRESENTADO EN LA CHI CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS, MONTREAL, 21-26 DE ABRIL DE 2018; BROWN BIRD DESIGN (*ilustración*)



NEUROCIENCIA

Pensamiento lento

Las ondas cerebrales de frecuencia superlenta están vinculadas con estados de consciencia

Cada pocos segundos, una onda de actividad eléctrica se propaga a través del cerebro, como una gran ola que se desplaza sobre el mar. Esas ondulaciones ultralentas se detectaron por primera vez hace décadas en imágenes de resonancia magnética funcional (RMf) de personas y animales que permanecían en reposo. Pero entonces se pensó que el fenómeno correspondía a «ruido» eléctrico o a la suma de señales cerebrales mucho más veloces, por lo que en gran parte se ignoró.

Ahora un estudio que ha medido esas ondas «infralentas» (de menos de 0,1 hercios) en ratones sugiere que representan un tipo distinto de actividad cerebral que depende del estado de consciencia del animal. No obstante, quedan grandes preguntas sobre el origen y la función de esas ondas.

La RMf detecta cambios en el riego sanguíneo que se suponen vinculados con la actividad neural. «Cuando se introduce a una persona en el escáner sin solicitarle que haga nada, se observa bastante ruido en la señal», explica Marcus Raichle, catedrático de radiología y neurología en la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington en St. Louis y autor principal del nuevo estudio, publicado en abril en *Neuron*. «Toda esa actividad en estado de reposo nos llevó a preguntarnos a qué se debía esa señal de la RMf.»

Para averiguar lo que sucedía en el cerebro, el equipo de Raichle combinó técnicas de resonancia magnética del calcio y la hemoglobina, que emplean moléculas fluorescentes para detectar la actividad neuronal a escala celular, con la electrofisiología, que registra las señales de esas células en diversas capas cerebrales.

Llevaron a cabo ambos estudios en ratones anestesiados, y también se registró la actividad eléctrica mientras los roedores permanecían despiertos pero descansando en diminutas hamacas en una sala a oscuras.

El equipo descubrió que las ondas infralentas atravesaban las capas corticales del cerebro de los ratones despiertos, y que variaban de dirección cuando eran anestesiados. Los investigadores afirman que esas ondas son distintas de las ondas delta (de 1 a 4 hercios) y de otra actividad cerebral de frecuencia superior.

Tales ondas superlentas pueden resultar esenciales para las funciones cerebrales, afirma Raichle. «Pensemos, por ejemplo, en las olas que surcan el estrecho de Puget, entre Canadá y EE.UU. Hay días muy duros en los que domina la mar de fondo y contemplamos cabrillas sobre las grandes olas», explica. Esas «grandes olas» facilitan que las regiones cerebrales entren en actividad, siguiendo con el símil, que se formen las cabrillas.

Otros investigadores alaban el enfoque general del estudio, pero dudan de que demuestre que las ondas infralentas sean totalmente distintas de las propias de la actividad cerebral. «Aconsejaría prudencia antes de llegar a la conclusión de que la RMf en estado de reposo esté midiendo otra propiedad del cerebro que no tiene nada que ver con las fluctuaciones de alta frecuencia entre las zonas de la corteza», advierte Elizabeth Hillman, profesora de ingeniería biomédica de la Universidad de Columbia, que no ha participado en el trabajo. Hillman publicó en 2016 el hallazgo de que las señales de la RMf en reposo corresponden a actividad neural de un amplio intervalo de frecuencias, no solo de las bajas.

Se necesitarán nuevos estudios para determinar con exactitud qué relación mantienen los diversos tipos de señales cerebrales. «Esos patrones de ondas son muy nuevos», subraya Hillman. «No tenemos muchas pistas de lo que son, y descubrirlo resulta realmente difícil.»

—*Tanya Lewis*

GETTY IMAGES (*ondas cerebrales*); MUSEO DE CIENCIAS NATURALES DE BARCELONA (*exposición*)

AGENDA

CONFERENCIAS

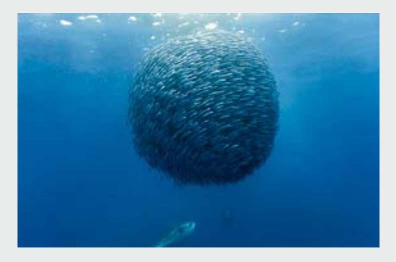
2 de julio
Ondas gravitacionales: De Einstein a una nueva ciencia
Barry Barish, premio nóbel de física 2017
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

9 de julio
Astronomía de ondas gravitacionales
Gabriela González, colaboración LIGO
Instituto de Química-Física Rocasolano
Madrid
coloquiocurie.csic.es

EXPOSICIONES

Eco-logía: La ciencia en las novelas de Umberto Eco
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
La Coruña
www.muncyt.es

Océanos: El último territorio salvaje
Museo de Ciencias Naturales
Barcelona
museuciencies.cat



OTROS

Del 1 al 13 de julio — Talleres
Tecnocamp: Una experiencia de acercamiento a la ingeniería
Para alumnos de ESO y Bachillerato
Universidad Carlos III
Madrid
www.uc3m.es

Del 5 al 8 de julio — Festival
Splashdown festival: El festival del cosmos en Asturias
Conferencias, talleres, cine, música y exposición
Centro de La Laboral - Ciudad de la Cultura
Gijón
www.splashdownfestival.space

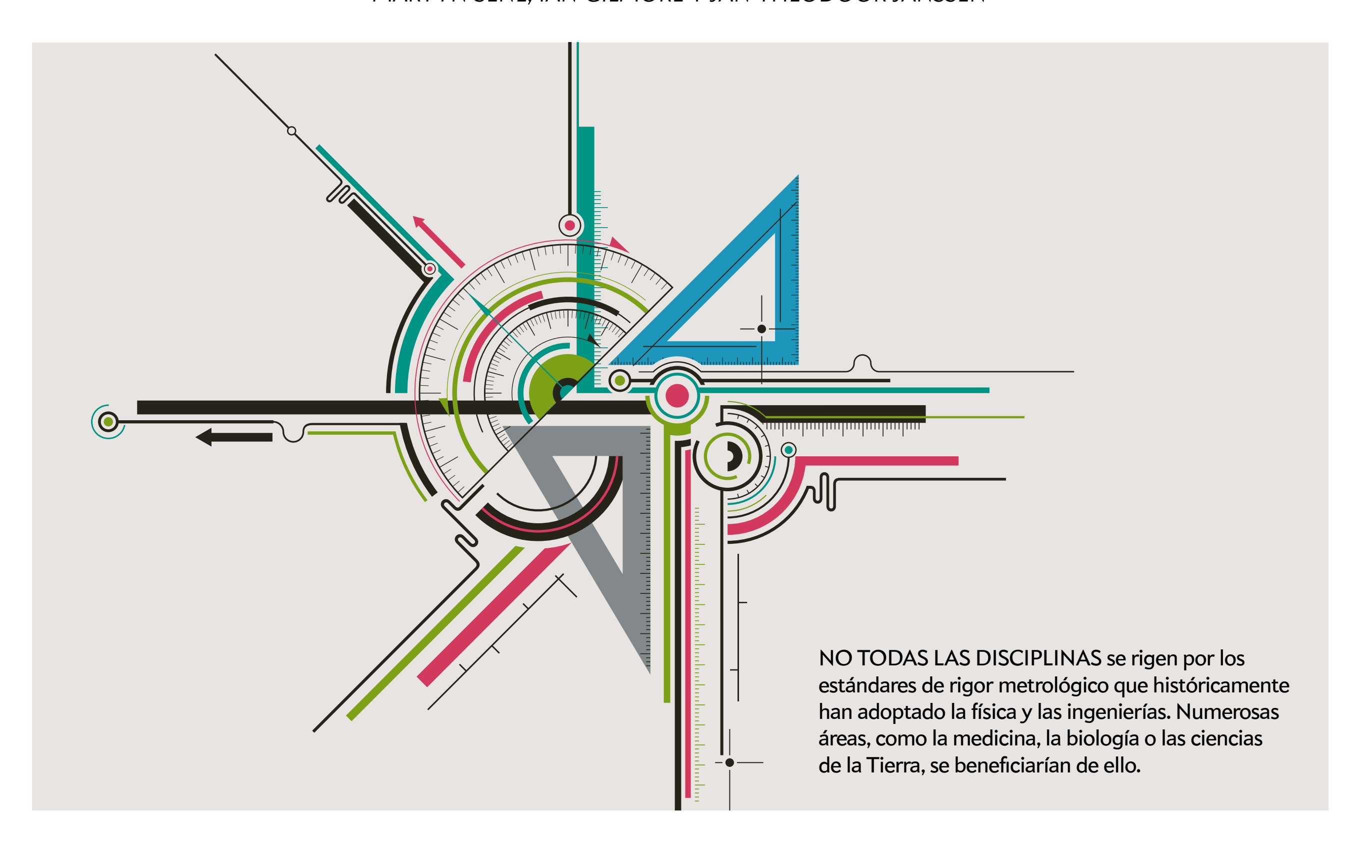
9-13, 16-20 y 23-27 julio — Actividades
Verano con Ciencia 2018
Para niños de entre 5 y 12 años
Parque de las Ciencias
Granada
parqueciencias.com

METROLOGÍA

La clave olvidada en el problema de la reproducibilidad

La crisis de reproducibilidad que atraviesan numerosas disciplinas se vería notablemente aliviada si los científicos de todas las áreas trabajasen junto con metrólogos

MARTYN SENÉ, IAN GILMORE Y JAN-THEODOOR JANSSEN



NO TODAS LAS DISCIPLINAS se rigen por los estándares de rigor metrológico que históricamente han adoptado la física y las ingenierías. Numerosas áreas, como la medicina, la biología o las ciencias de la Tierra, se beneficiarían de ello.

Imagine que es usted un legislador que necesita conocer la cantidad de carbono almacenada en las selvas de Sudamérica. Los datos sobre el terreno son escasos, por lo que, cuando descubre que acaban de publicarse dos mapas de biomasa superficial elaborados a partir del mismo conjunto de datos por satélite, piensa que es su día de suerte. Por desgracia, los mapas muestran una diferencia del 20 por ciento en las estimaciones de biomasa continental, con diferencias aún mayores a nivel local. ¿Puede confiar en alguno de ellos? ¿En cuál?

En los últimos años se ha vertido mucha tinta sobre la crisis de reproducibilidad que atraviesa la ciencia. En muy raras ocasiones se incentiva a los investigadores para que traten de repetir experimentos y, cuando lo hacen, con frecuencia los resultados no coinciden.

En este debate se ha prestado poca atención a la metrología, la ciencia de la medición. Los metrólogos nos dedicamos a fijar puntos de referencia acordados internacionalmente para que las medidas —ya se trate de longitud, masa, dosis de radiación o actividad genética— puedan compararse con un patrón de referencia dentro de unos márgenes de incertidumbre conocidos. También colaboramos con quienes se encargan de efectuar mediciones en aras de diseñar y difundir las mejores prácticas. Creemos necesario atender a estos estándares y procedimientos, así como al desarrollo de otros nuevos, a fin de ayudar a los investigadores a replicar sus resultados.

El ámbito académico actual, cada vez más multidisciplinar y cambiante, reúne a científicos de especialidades muy diversas que emplean todo tipo de técnicas y terminologías. Eso puede hacer que las mediciones no se validen de la manera adecuada. A menudo, entre los datos en bruto y el resultado final se interponen programas informáticos que procesan valores numéricos y combinan automáticamente conjuntos de datos. La cuantificación de la incertidumbre en el resultado final puede perderse en medio de tales manipulaciones. Por ello, es frecuente que los investigadores consideren todas esas herramientas como una «caja negra» que arroja respuestas en las que confiar, pero que a menudo dificultan intuir cuándo podrían ser incorrectas.

Un nuevo enfoque sobre la manera en que se recopilan, se registran y se analizan los datos podría ayudar a resolver el rompecabezas de la reproducibilidad. En el ejemplo de las selvas sudamericanas, las variaciones en la calibración de los instrumentos, la incertidumbre en los datos de referencia terrestres y las diferencias en los métodos de modelización generaron la divergencia en los resultados. Una investigación seria sobre cómo y por qué se producen estas discrepancias puede revelar errores sistemáticos o, al menos, cuantificar la incertidumbre en las mediciones. Sin un trabajo así, es imposible que dos mapas como los mencionados coincidan jamás.

Esfuerzo internacional

Nuestro centro, el Laboratorio Nacional de Física (NPL) del Reino Unido, es una de las docenas de instituciones metrológicas de todo el mundo sobre las que pivota el sistema internacional de unidades. Ello brinda el marco, los instrumentos y la experiencia que permiten reproducir medidas de manera fiable y con una incertidumbre cuantificada en cualquier lugar del planeta.

Los beneficios de una buena práctica metrológica se llevan cosechando desde hace cientos de años. En el siglo XIX, un sistema acordado y coherente para medir longitudes y masas contribuyó a que los países aumentasen su confianza en cuánto se compraba y se vendía en los mercados internacionales, así como en la precisión de los mapas. Se fabricaron prototipos del metro y del kilogramo y se guardaron bajo llave en una cámara en Francia para que nadie pudiera poner en tela de juicio su verdadero valor. La Revolución Industrial despegó porque se consensuaron principios comunes de fabricación, como los tipos de tornillos. Dos siglos después, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) depende de satélites equipados con relojes atómicos altamente sincronizados que miden el tiempo con enorme precisión. Y, aunque Albert Einstein postuló que la velocidad de la luz era constante, fue la comunidad metrológica la que la midió y le asignó un valor convenido.

Hoy, la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, por sus siglas en francés), con sede en París, coordina un sólido marco metrológico para las siete unidades básicas, desde el metro hasta el kelvin. Y los avances continúan: en noviembre de este año se modificará la definición del kilogramo y otras unidades, lo que pondrá fin a un proyecto de años para definir todas las unidades de medida en términos de constantes fundamentales e inmutables de la naturaleza, determinadas con un enorme grado de precisión (en el caso del kilogramo, la nueva definición se basará en la constante de Planck). Si un investigador recibe una formación metrológica adecuada, sigue procedimientos claros y calibra sus mediciones con un estándar directamente relacionado con las unidades básicas, sus resultados serán dignos de confianza.

Dicho sistema puede funcionar con suma eficacia incluso en proyectos muy complejos que generen grandes cantidades de datos con todo tipo de instrumentos. La detección del bosón de Higgs en 2012 y la observación de ondas gravitacionales en 2016, por ejemplo, se llevaron a cabo con tal atención al detalle que produjeron resultados cuantitativos de los que hoy todo el planeta puede fiarse.

Áreas problemáticas

Pese a todo, un creciente número de campos de investigación carece de un marco metrológico. Este es el caso de disciplinas como la biología y las ciencias ambientales, ajenas a la larga historia de prácticas metrológicas de la que gozan la física y las ingenierías. Definir unidades de medida en el ámbito de las ciencias de la vida constituye una tarea intrínsecamente peliaguda. Y es que, si bien todos los electrones tienen la misma masa y la misma carga, los seres vivos presentan un amplio abanico de variabilidad natural, lo que obstaculiza el desarrollo y la definición de estándares. Sin embargo, antes de comenzar a abordar dicha variabilidad, deberíamos asegurarnos de que las mediciones que sabemos efectuar y las herramientas que somos capaces de caracterizar se asientan sobre cimientos sólidos.

Uno de los campos problemáticos es la radioterapia, la cual se basa en el empleo de radiación ionizante para destruir tumores o influir de otro modo en las células. Aunque existe una estricta regulación sobre cómo medir la dosis administrada a pacientes en entornos clínicos, no ocurre lo mismo cuando se trata de estudios de laboratorio que intentan cuantificar el impacto de la radiación en las células. Un informe de 2013 del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de EE.UU. halló que, de los artículos publicados en la revista *Radiation Research* a lo largo de un año, tan solo el 7 por ciento citaba guías o normas de dosimetría. El análisis del NIST concluía que la medición radiobiológica es «con frecuencia inadecuada, lo que socava la fiabilidad y la reproducibilidad de los hallazgos». Eso levanta una barrera a la hora de trasladar los estudios preclínicos a la práctica médica y aumenta de forma innecesaria el número de animales usados en los ensayos.

En respuesta a esta situación, varios centros estadounidenses están trabajando para estandarizar la dosimetría. En el Reino Unido, el NPL marca el camino a seguir en cuanto a servicios específicamente destinados a estudios preclínicos.

La observación de la Tierra también presenta problemas. La luz que refleja la superficie del planeta, por ejemplo, puede calibrarse razonablemente bien a partir de la reflexión en las regiones polares y los desiertos. A pesar de que este efecto se ha estudiado lo suficientemente bien para obtener resultados coherentes y reproducibles con distintos satélites, la información sigue sin ser todo lo fiable que debería para usarla en estudios sobre el cambio climático o en mediciones de cobertura forestal.

A modo de ejemplo, considere cuatro satélites que monitorizan el índice de área foliar, un parámetro proporcional al porcentaje de terreno cubierto por hojas verdes fotosintéticamente activas. Estos cuatro instrumentos (CYCLOPES, GEOLAND, GLOBCARBON y MODIS) tienen una resolución de un kilómetro. Sin embargo, los datos mensuales a lo largo de dos años varían en exceso de unos a otros, a veces en un factor superior a siete. Las razones son complejas. En primer lugar, los satélites pasan en momentos ligeramente distintos, por lo que la propiedad que se mide podría haber cambiado. Pero también hay diferencias en la manera en que se calibran los instrumentos y se analizan los datos. Los investigadores están trabajando en la puesta en marcha de un sistema riguroso de validación a largo plazo y en el desarrollo de técnicas para comparar las distintas medidas, con el objetivo de desentrañar las incertidumbres sistemáticas y generar datos más fiables.

Otro ejemplo similar lo hallamos en el Proyecto Versalles sobre Estándares y Materiales Avanzados (VAMAS). Fundado en 1982, fue diseñado con el fin de desarrollar buenas prácticas y procedimientos internacionales para fabricar y medir las

propiedades de nuevos materiales. Está resultando de gran utilidad para caracterizar materiales bidimensionales, como el grafeno, hasta el punto de que hoy es posible determinar la pureza y el espesor a escala atómica.

En la actualidad, los institutos nacionales de metrología abanderan la dura empresa de normalizar un buen número de mediciones biológicas, como la cuantificación de pequeñas cantidades de proteínas en sueros complejos. Estos esfuerzos conjuntos revisten una importancia extraordinaria; pero, aun así, continúan sin gozar del encanto y el atractivo de los que disfruta la investigación orientada a efectuar descubrimientos.

Vías de progreso

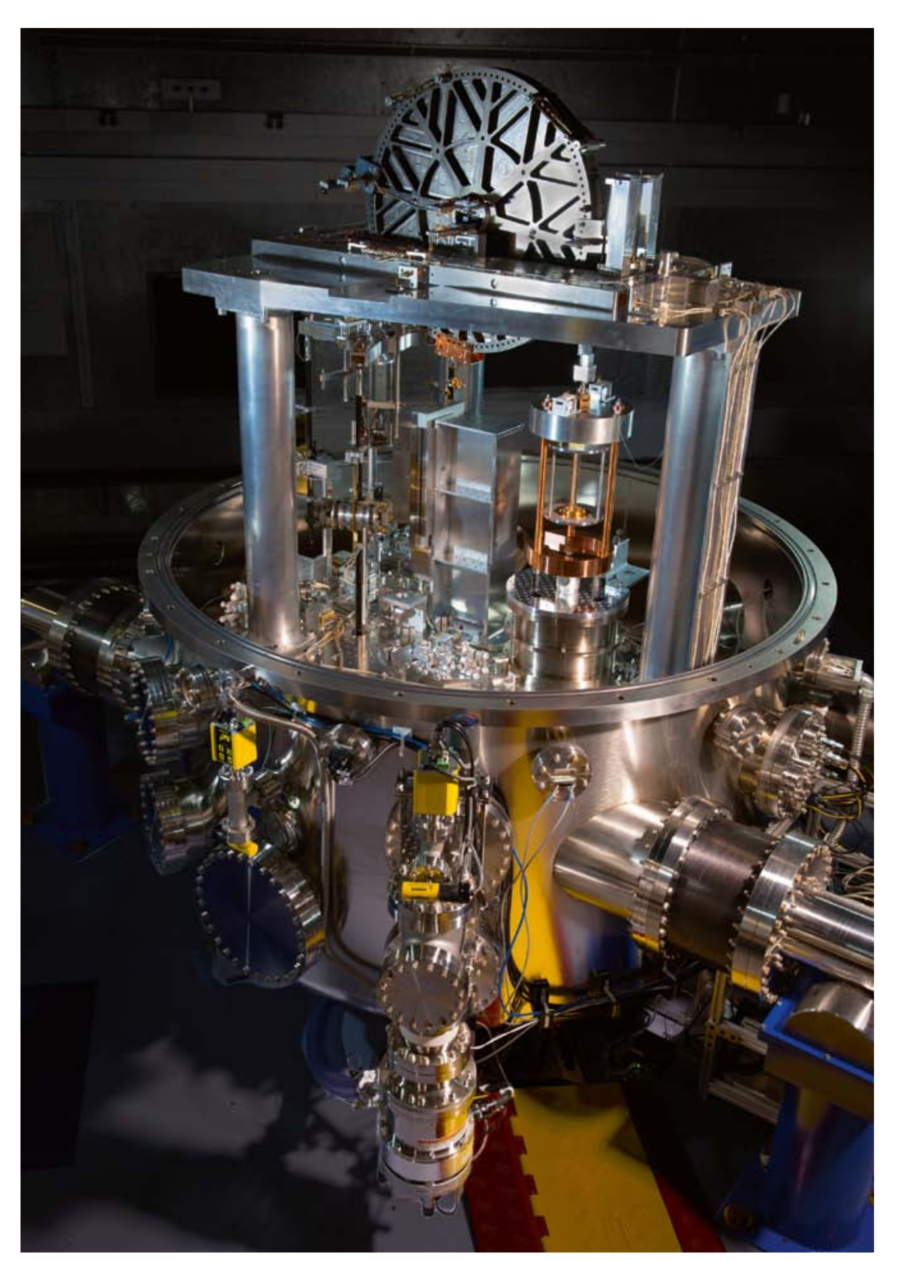
Así pues, ¿qué cabe hacer al respecto? Un sencillo paso consistiría en que los organismos de financiación involucrasen a más metrólogos en la evaluación y selección de proyectos. Eso alentaría la inversión en estudios de reproducibilidad, ayudaría a garantizar que los proyectos financiados se rigen por buenas prácticas metrológicas, y fijaría las pautas para futuros intentos de corroboración. Además del impacto de un proyecto, las subvenciones deberían evaluar sus vías de reproducibilidad.

A menudo, los organismos de financiación exigen que los datos en bruto que respaldan una investigación se registren y se hagan públicos. Tal requisito debería extenderse a la información sobre la calidad de los datos: cada proyecto tendría que especificar con claridad de qué manera y con qué rigor actuaron los investigadores para garantizar que sus mediciones se ajustasen a un estándar reconocido internacionalmente y para cuantificar el grado de incertidumbre. Si esta información se almacenase de forma sistemática, sería mucho más sencillo rastrear el grado de incertidumbre que conlleva el proceso de combinación y tratamiento de datos.

Algunas organizaciones ya están dando pasos en esa dirección. Por ejemplo, la Red de Investigación de Ecosistemas Terrestres de Australia (TERN) dispone de un marco y una guía de buenas prácticas para recopilar esta clase de «metadatos». Por su parte, el NPL está protagonizando el desarrollo de sistemas de control de calidad para los datos referentes a la observación de la Tierra que se envían al Servicio Europeo de Cambio Climático Copérnico (C3S). Ello asegurará que toda la información almacenada en el C3S sea completamente rastreable y esté bien documentada.

La cuantificación de la incertidumbre en problemas complejos está casi convirtiéndose en una especialidad en sí misma. La comunidad metrológica ha de afrontar este reto atrayendo a más estadísticos, expertos en datos e investigadores en áreas problemáticas, como la biología celular. La metrología debería pasar a formar parte de la formación científica a todos los niveles, a fin de lograr que todos los ámbitos de la ciencia se comprometan con la precisión de las medidas.

Mientras tanto, los investigadores deberían sacar el máximo provecho de sus institutos nacionales de metrología. Sorprende saber cuántos científicos no han oído hablar nunca de nosotros. Si un laboratorio se topa con problemas a la hora de reproducir sus resultados, lo único que ha de hacer es llamarnos: nuestra función incluye proporcionar asesoramiento, mejorar las técnicas de medida existentes y desarrollar otras nuevas. Medimos casi todos los parámetros físicos y químicos imaginables, desde el tiempo, con una pre-



LA BALANZA DE KIBBLE NIST-4 (*imagen*), del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU., ha medido la constante de Planck con una precisión de 34 partes por mil millones. Gracias a ello, este año los metrólogos podrán acometer la largamente esperada redefinición del kilogramo.

J. L. LEE/NIST

cisión mayor de un segundo en la vida del universo, hasta la cantidad y la localización de la absorción de fármacos en células individuales. A menudo, hablar con nosotros ahorra tiempo y aumenta la precisión de los resultados.

La tarea que tenemos ante nosotros es tan compleja que la comunidad metrológica no puede abordarla por sí sola. Sin embargo, sí requiere que todos adoptemos la mentalidad de los metrólogos: atención al detalle y devoción por comparar todos los resultados.

__Martyn Sené__ es físico nuclear y subdirector del Laboratorio Nacional de Física (NPL) del Reino Unido. __Ian Gilmore__ investiga en el NPL y es fundador del Centro Nacional de Excelencia en Espectrometría de Masas del Reino Unido. __Jan-Theodoor Janssen__ es experto en tecnología cuántica del estado sólido y director de investigación en el NPL.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 547, págs. 397-399, 2017. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Uncertainty in the spatial distribution of tropical forest biomass: A comparison of pan-tropical maps. Edward T. A. Mitchard et al. en *Carbon Balance and Management*, vol. 8, n.º 10, octubre de 2013.
The importance of dosimetry standardization in radiobiology. Marc Desrosiers et al. en *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 118, págs. 403-418, diciembre de 2013.
Improved reproducibility by assuring confidence in measurements in biomedical research. Anne L. Plant et al. en *Nature Methods*, vol. 11, págs. 895-898, agosto de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Revisión del Sistema Internacional de Unidades. Robert Wynands y Ernst O. Göbel en *IyC*, julio de 2010.
El futuro del tiempo. David Finkleman et al. en *IyC*, diciembre de 2011.
El nuevo kilogramo. Tim Folger en *IyC*, abril de 2017.

BIOLOGÍA MOLECULAR

La vida íntima de las proteínas celulares

Desarrollan un novedoso método para ver la estructura tridimensional y el funcionamiento de complejos proteicos en células vivas

ORIOL GALLEGO

Entender el modo en que la célula lleva a cabo cada una de sus funciones constituye uno de los principales retos de la biología. Las proteínas son las moléculas responsables de la mayoría de esas funciones. Pero ¿cuál es el mecanismo que utilizan para ejecutarlas?

Dentro de la célula, las proteínas se unen entre sí como piezas de un dispositivo para formar los llamados complejos proteicos. A su vez, distintos complejos se coordinan entre sí para construir engranajes moleculares superiores responsables de llevar a cabo las funciones celulares. Para comprenderlo mejor, podemos hacer un símil con el motor de un coche: cada proteína equivaldría a una pieza, y los complejos proteicos, a los distintos dispositivos del motor (pistones, válvulas, correa de distribución, etcétera). Por sí solos, la funcionalidad que tienen estos dispositivos es limitada, necesitan ensamblarse adecuadamente para formar el motor o, en el caso de la célula, el engranaje molecular.

Los científicos han desarrollado técnicas muy avanzadas que permiten ver cada uno de los átomos que forman una proteína. Son los llamados métodos in vitro, como la cristalografía de rayos X o la criomicroscopía electrónica (el desarrollo de esta última mereció el premio Nobel de química de 2017). Estos han sido fundamentales en los avances de las últimas décadas y han ayudado a desarrollar numerosos medicamentos, como antibióticos o fármacos contra el cáncer. Pero para utilizar estas técnicas hace falta extraer el engranaje molecular de la célula, desensamblarlo, aislar cada uno de los complejos de proteínas que lo componen y observarlos por separado en tubos de ensayo, lo cual nos ofrece un conocimiento incompleto de su actividad. De la misma manera que para entender cómo funciona un motor no es suficiente con observar sus piezas por separado, es fácil imaginar que, sin estudiar los engranajes moleculares íntegramente y en funcionamiento, nuestro conocimiento sobre su mecanismo de acción va a ser solo parcial.

Por este motivo, científicos de distintas disciplinas han colaborado para desarrollar nuevas técnicas que nos permitan superar esas limitaciones, de modo que podamos visualizar cómo operan los engranajes moleculares en las mismas células. Recientemente, junto con los grupos de Marko Kaksonen, de la Universidad de Ginebra, y Damien Devos, del Centro Andaluz de Biología del Desarrollo, nuestro grupo ha ideado un nuevo método para extender el estudio estructural de complejos moleculares y observar su funcionamiento en células vivas. Con él hemos logrado visualizar la maquinaria de la exocitosis, un proceso esencial para todos los animales y plantas mediante el cual las células segregan moléculas al exterior.

Ver proteínas en células vivas

La mayor parte de las proteínas presentan un tamaño que no supera los pocos nanómetros y, por lo tanto, no podemos distinguirlas en la célula con los microscopios habituales.

El método más extendido para observarlas en células vivas es la microscopía de fluorescencia. Algunos seres vivos tienen la capacidad de producir luz mediante un proceso denominado bioluminiscencia. En el mar, por ejemplo, podemos encontrar medusas fluorescentes. En 2008, se concedió el Nobel de química a tres científicos que descubrieron y desarrollaron la proteína fluorescente verde (GFP, por sus siglas en inglés). Esta es producida por la medusa *Aequorea victoria*, capaz de emitir luz verde. Gracias a microscopios diseñados para detectar la luz de GFP, podemos observar proteínas

fusionadas a ella en el interior de una célula viva. Otra proteína fluorescente es mCherry, la cual emite luz roja. Así pues, mediante microscopía de fluorescencia podemos observar a la vez la actividad de dos proteínas: una fusionada a GFP y otra a mCherry.

Sin embargo, las imágenes obtenidas mediante microscopía de fluorescencia solo tienen 250 nanómetros de resolución, por lo que no nos permiten distinguir cómo actúan estas dos proteínas dentro del mismo complejo molecular.

En 2014, el Nobel de química se otorgó de nuevo a un avance en la microscopía de fluorescencia, la llamada nanoscopía de fluorescencia, o microscopía de superresolución. Esta técnica logra obtener imágenes con una resolución de unos pocos nanómetros, lo que ha contribuido a determinar la organización de algunos engranajes moleculares directamente en células vivas. Pero, en la práctica, la nanoscopía in vivo se ha visto limitada por su lentitud a la hora de adquirir imágenes, y su uso no se ha podido generalizar más allá de algunos complejos proteicos relativamente estáticos.

Inmovilizar los complejos

¿Cómo podemos reconstruir la estructura de complejos proteicos in vivo si la mayoría de estos se halla en constante movimiento? Para superar este obstáculo hemos creado células dotadas de plataformas estáticas de anclaje en las que podemos fijar complejos, de modo que, mediante nanoscopía, podemos determinar la posición de cada uno de sus componentes fusionados a GFP.

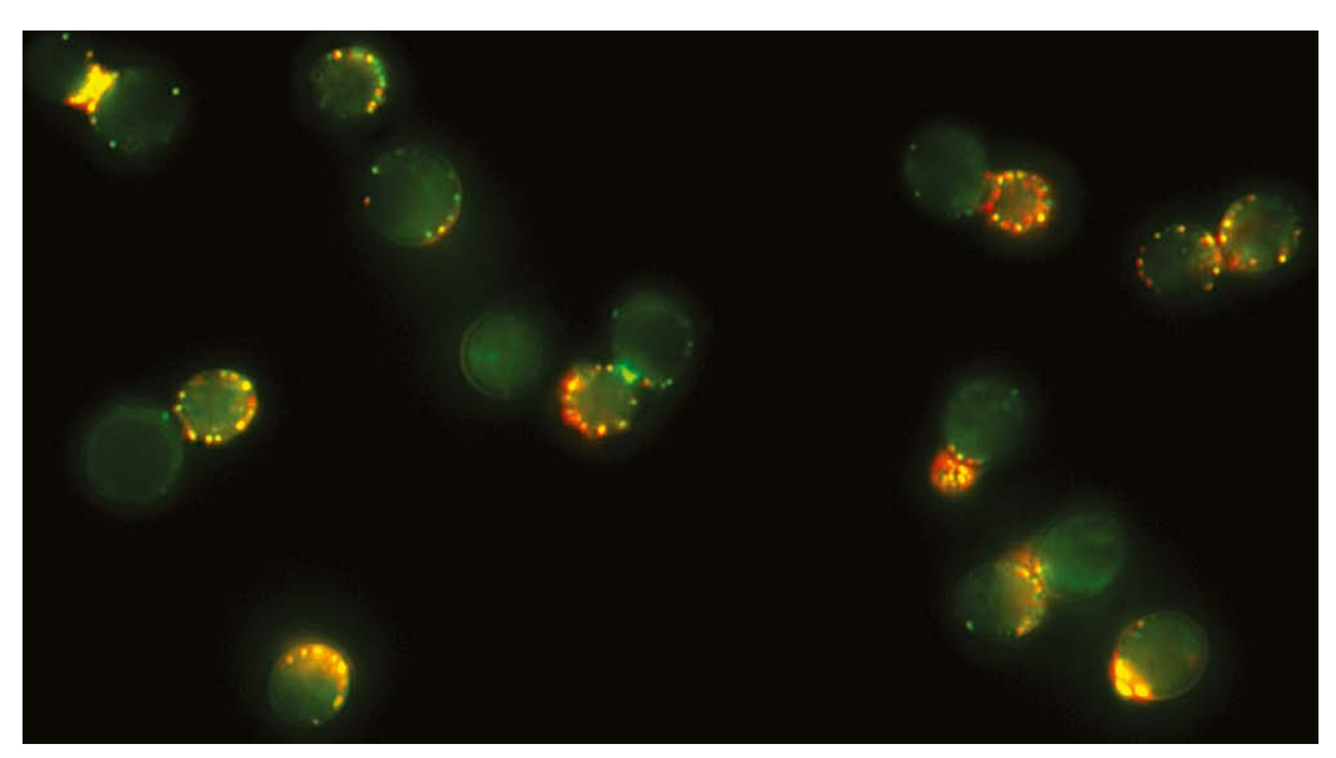
Hemos realizado nuestros experimentos en células de levadura. Este organismo es fácil de manipular genéticamente y, además, sus engranajes moleculares encargados de ejecutar la exocitosis son similares a los engranajes humanos. Con técnicas de modificación del ADN, hemos diseñado células con plataformas de anclaje fusionadas a mCherry. Estas plataformas intracelulares actúan como pinzas capaces de atrapar complejos moleculares concretos. Mediante nanoscopía hemos medido la distancia entre las proteínas marcadas con GFP y la plataforma de anclaje marcada con mCherry con una precisión de hasta 2 nanómetros.

Así, la plataforma también actúa como punto de referencia desde donde podemos localizar la posición relativa de cada proteína. Pero nuestro método tiene una limitación: las medidas se hacen en imágenes 2D y, por lo tanto, la distancia medida corresponde a la proyección del engranaje molecular en la imagen y no a su arquitectura 3D real. ¿Cómo podemos determinar la arquitectura 3D de estos engranajes a partir de imágenes en 2D?

El método que usamos guarda semejanza con el sistema GPS, el cual localiza un teléfono móvil a partir de la distancia del emisor a tres satélites que actúan como puntos de referencia. En nuestro caso, solo tenemos una plataforma de anclaje como punto de referencia, pero esta nos permite controlar la orientación del engranaje molecular fijado respecto al plano de la imagen. Es decir, podemos observar el engranaje molecular desde distintas perspectivas. Para cada orientación, la proyección del engranaje en la imagen 2D será distinta según la perspectiva desde la que sea observado, y por lo tanto, la distancia que separa la proteína fusionada a GFP y la plataforma de anclaje fusionada a mCherry cambiará en consonancia. La integración de todas las distancias medidas al observar el engranaje molecular desde tres orientaciones (o más) permite reconstruir la arquitectura 3D del engranaje molecular.

El engranaje molecular de la exocitosis

El principal proceso para segregar moléculas al exterior celular se llama exocitosis, la cual resulta fundamental en la

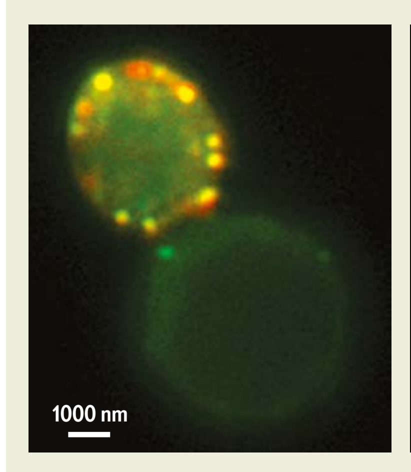


CORTESÍA DEL AUTOR

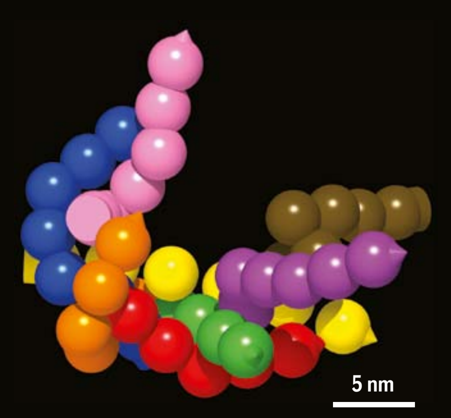
LOS MÉTODOS HABITUALES de microscopía de fluorescencia no ofrecen la suficiente resolución para visualizar in vivo la estructura de los complejos de proteínas. En las células de la levadura, estos métodos solo nos permiten observar la localización de los complejos implicados en la exocitosis (*amarillo*).

UN COMPLEJO MOLECULAR AL DESCUBIERTO

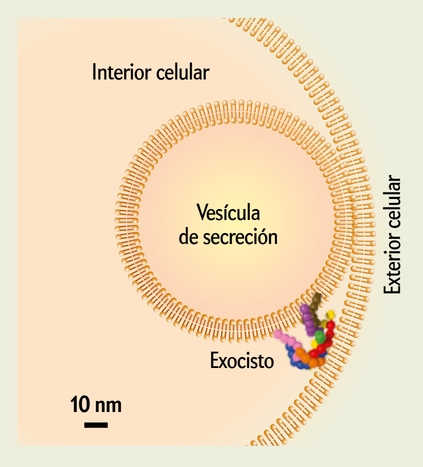
HASTA AHORA, las técnicas de micro- y nanoscopía no permitían obtener imágenes de los complejos moleculares de células vivas con suficiente detalle. Un nuevo método, basado en el uso de «pinzas moleculares» fluorescentes capaces de inmovilizar dichos complejos, ha conseguido vencer ese obstáculo. Gracias a él los investigadores han obtenido la primera imagen tridimensional del exocisto, el complejo molecular que interviene en la secreción de sustancias celulares.



(1) Fluorescencia e inmovilización del complejo
Las células de levadura se modifican genéticamente para que generen «pinzas» intracelulares que emitan luz fluorescente e inmovilicen los exocistos (*amarillo*).



(2) Nanoscopía de alta resolución
Una vez inmovilizado, las técnicas de nanoscopía ya pueden reconstruir la estructura del exocisto: este se encuentra formado por ocho proteínas (*colores*) unidas entre sí por los extremos.



(3) Múltiples tomas
Por último, seguir la posición del complejo en distintos momentos revela su funcionamiento: la arquitectura del exocisto permite la unión de la vesícula de secreción y la membrana plasmática.

comunicación entre las células. Se trata de un mecanismo complicado en el que se hallan involucrados distintos complejos proteicos y membranas biológicas. La vesícula de secreción es el embalaje en el que se transportan aquellos componentes celulares destinados a la secreción. En primer lugar, la maquinaria molecular encargada captura y fija la vesícula a la cara interna de la membrana plasmática (esta define el perímetro exterior de la célula). A continuación, se induce la fusión de la vesícula con la membrana plasmática, lo que permite liberar al exterior la carga que la vesícula transportaba. A pesar de su importancia, el mecanismo molecular que ejecuta y coordina cada una de estas etapas de la exocitosis sigue suponiendo un misterio.

En un primer paso, nuestro grupo ha conseguido determinar, en células de levadura, la arquitectura del exocisto, el complejo de ocho proteínas encargado de fijar las vesículas a la membrana plasmática. Además, lo hemos hecho mientras este complejo se hallaba unido a la vesícula de secreción. Las subunidades del exocisto presentan una conformación alargada gracias a la cual pueden mantenerse entrelazadas entre sí por uno de sus extremos. Pero, a la vez, cada una de estas proteínas proyecta su otro extremo en una dirección distinta. Esta configuración de las proteínas del exocisto permite al complejo proteico permanecer a un lado mientras mantiene la vesícula en contacto directo con la membrana plasmática.

Ampliar horizontes

Saber cómo la célula lleva a cabo cada una de sus funciones es imprescindible para el desarrollo de la biomedicina. Nuestro método abre la posibilidad de realizar estudios comparativos sobre los engranajes moleculares en células sanas y células enfermas. Los resultados podrían señalar cuáles son los defectos que originan las enfermedades y diseñar nuevos tratamientos que los puedan reparar.

En nuestro laboratorio seguimos trabajando para determinar la arquitectura 3D del engranaje molecular completo encargado de la exocitosis. En el futuro, esperamos entender cómo logra la célula controlar y ejecutar esta función. Además, seguimos colaborando con laboratorios de otros campos de investigación para complementar nuestros conocimientos y seguir desarrollando técnicas híbridas que abran nuevos horizontes en el campo de la biología celular y la biología estructural. Una de nuestras prioridades es el diseño de células humanas con plataformas de anclaje similares a las que hemos creado en la levadura. El futuro pasa por integrar varios métodos y combinar las ventajas de cada uno de ellos para hacer visibles aquellos mecanismos moleculares que la célula sigue ocultando a nuestros ojos.

Oriol Gallego
es investigador de la Unidad de Biofísica y Biología Celular del Laboratorio Europeo de Biología Molecular en Heidelberg.

PARA SABER MÁS

The in vivo architecture of the exocyst provides structural basis for exocytosis. A. Picco et al. en *Cell*, vol. 168, págs. 400-412, art. e418, enero de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Filmar el movimiento de las moléculas. Petra Fromme y John C. H. Spence en *IyC*, julio de 2017.

EVOLUCIÓN

EL INESPERADO TRIUNFO DE LOS DINOSAURIOS

Nuevos fósiles y análisis desbaratan la visión ortodoxa de cómo llegaron a dominar la Tierra

Stephen Brusatte

Ilustración de James Gurney



UN CAMPEÓN: *Dromomeron*, un dinosaurio arcaico, se acerca con cautela a la orilla para abrevar hace 212 millones de años, en un lago próximo al actual Rancho Fantasma, Nuevo México. El anfibio gigante *Koskinonodon* anda al acecho.



Stephen Brusatte es paleontólogo en la Universidad de Edimburgo, donde investiga la anatomía y la evolución de los dinosaurios. Es el autor del libro *The rise and fall of the dinosaurs* (William Morrow, 2018).



Mi amor por los fósiles nació durante la adolescencia, en el cambio de milenio, justo en el momento en que el Museo Field de Chicago desmontaba su esqueleto de *Brachiosaurus* para emplazar un *Tyrannosaurus rex*. Sustituía así un dinosaurio emblemático por otro. Aquel herbívoro colosal, con un peso superior al de diez elefantes y un cuello arqueado que sobresalía por encima de la galería de la segunda planta cedía su lugar al depredador más temible de todos los tiempos, una bestia tan grande como un autobús con una dentadura que hacía añicos los huesos de sus presas.

Esos son los dinosaurios que desataron mi imaginación mientras crecía a 120 kilómetros de Chicago, entre maizales y campos de frijoles en el medio oeste de Estados Unidos. Acudí a visitarlos tantas veces como pude convencer a mis padres de que tomaran el volante para recorrer el trayecto. Me cautivaba alzar la vista ante aquellos esqueletos: el tamaño, la fuerza, aquel cuerpo tan distinto de cualquier animal viviente. No era de extrañar que dominasen la Tierra durante más de 150 millones años.

Pero ¿cómo alcanzaron la hegemonía? Esa pregunta no me la formulé en aquellos años en que gestaba mi vocación. De igual manera que me costaba imaginar que mis padres hubiesen sido niños alguna vez, suponía que los dinosaurios habían surgido como por arte de magia en el pasado remoto, ya como gigantes de cuello largo y feroz dentadura. Entonces lo ignoraba, pero esa idea no difería mucho de la mantenida por la mayoría de los científicos durante gran parte del siglo xx: eran singulares, veloces y ágiles, provistos de un metabolismo que les permitió superar sin dificultad y con rapidez a todos los rivales y extender su dominio por el planeta.

Nada habría cambiado si en los últimos 15 años no se hubieran sucedido gran número de descubrimientos paleontológicos, no hubieran visto la luz nuevos estudios sobre el ambiente en el que vivieron los primeros dinosaurios, y no se hubieran aplicado métodos innovadores al trazado de los árboles genealógicos y de los cambios evolutivos, avances que han desmantelado la visión clásica. Gracias a todas esas aportaciones, la nueva hipótesis resulta bastante distinta: surgidos de modo gradual, durante los primeros 30 millones de años, su presencia quedó limitada a ciertas regiones del globo al ser superados por otros animales. Solo dos golpes de suerte allanaron el camino hacia su hegemonía.

ORÍGENES HUMILDES

A semejanza de otras formas de vida prósperas, los dinosaurios nacieron de la catástrofe. Hace unos 252 millones de años, en las postrimerías del período Pérmico, una gran masa de magma comenzó a rugir bajo la actual Siberia. En la superficie, la fauna, un conjunto exótico de grandes anfibios, reptiles de piel rugosa y carnívoros precursores de los mamíferos, medraba ignorante de la devastación inminente. Corrientes de roca líquida ascendieron serpenteando a través del manto y de la corteza hasta aflorar por grietas de más de un kilómetro y medio de ancho. Durante cientos de miles, quizá millones de años, las erupciones arrojaron calor, cenizas, gases y suficiente lava como para cubrir varios millones de kilómetros cuadrados de Asia. La temperatura se disparó, los mares se acidificaron y los ecosistemas se derrumbaron: todo ello provocó la extinción del 95 por ciento de las formas de vida. Ha sido la peor extinción masiva de la historia terrestre. Pero un puñado de afortunados consiguió sobrevivir hasta el siguiente período geológico, el Triásico. A medida que los volcanes se apaciguaban y los ecosistemas se estabilizaban, hallaron ante sí un mundo casi vacío de competidores. Entre ellos, varios anfibios y reptiles menudos se diversificaron a medida que las condiciones mejoraron: son los antepasados de los mamíferos, lagartos, tortugas, salamandras y ranas actuales.

Los paleontólogos los conocen gracias a las impresiones de huellas que dejaron en los sedimentos de las orillas de ríos y lagos y que hoy han quedado expuestas en la sierra de Santa Cruz, Polonia. Durante más de 20 años, Grzegorz Niedźwiedzki, criado en esa región y ahora paleontólogo en la Universidad de Uppsala, ha estudiado con afán esas pistas fósiles; en alguna ocasión, acompañado por mí. En 2005, mientras exploraba a lo largo de un arroyuelo lleno de zarzas, cerca del pueblo de Stryczowice, descubrió unas huellas inusuales que no parecían pertenecer a ningún anfibio o reptil común. Las extrañas impresiones tenían las dimensiones de la zarpa de un gato y formaban dos hileras estrechas en las cuales las marcas de las extremidades delanteras precedían a las huellas ligeramente más grandes de las traseras. En las primeras se distinguían cinco dedos y, en las segundas, tres dedos centrales largos flanqueados por dos pequeñas protuberancias, una a cada lado. Las pistas se atribuyeron a un nuevo

EN SÍNTESIS

La visión arraigada sobre el origen de los dinosaurios sostiene que, gracias a su metabolismo y a su mayor velocidad, agilidad e inteligencia, desbancaron con rapidez a sus competidores hasta dominar el planeta.

Los nuevos descubrimientos y estudios paleontológicos han dado la vuelta a ese escenario, pues muestran que el linaje de los dinosaurios languideció durante millones de años antes de superar a sus rivales y alcanzar la hegemonía.



LAS HUELLAS FÓSILES de *Prorotodactylus* muestran que, hace unos 250 millones de años, los dinosauromorfos, precursores de los dinosaurios, vagaban por la actual sierra de la Santa Cruz, Polonia.

GRZEGORZ NIEDŹWIEDZKI, UNIVERSIDAD DE UPPSALA

género: *Prorotodactylus*. Lo único que conocemos de él son sus huellas, pues no se han hallado restos del esqueleto.

Prorotodactylus ronda los 250 millones de años de antigüedad, apenas uno o dos millones de años después de las erupciones que marcaron el final del Pérmico. La escasa distancia que separa las pisadas de ambos lados del cuerpo entre sí permite clasificar a su artífice en un grupo especializado de reptiles surgido tras la extinción del Pérmico, el de los arcosaurios, cuyos integrantes adquirieron una postura erguida que les permitió correr más rápido, dar zancadas más largas y perseguir a sus presas con más agilidad. Que el autor de las pistas fuera un arcosaurio primitivo podría tener algún significado y ofrecer información sobre el origen de los dinosaurios. Casi desde el mismo momento de nacer, los arcosaurios se dividieron en dos grandes linajes que entablarían una suerte de carrera evolutiva durante el resto del Triásico: los pseudosuquios, de cuyo linaje descienden los cocodrilos; y los avemetatarsalianos, antepasados de los dinosaurios. Pero ¿a qué grupo pertenece *Prorotodactylus*?

Con el fin de averiguarlo, colaboré con Niedźwiedzki y Richard J. Butler, de la Universidad de Birmingham. El análisis de las huellas, publicado en 2011, reveló peculiaridades que las vinculaban con rasgos propios de las patas de los dinosaurios: la disposición digitígrada de los huesos, por la que solo los dedos tocan el suelo durante la marcha, y un pie muy estrecho con tres dedos principales. En suma, *Prorotodactylus* era un dinosauromorfo: no un dinosaurio propiamente dicho, sino un miembro primitivo del subgrupo de los avemetatarsalianos, que engloba a los dinosaurios y a sus parientes afines. Los integrantes del grupo poseían colas largas, potente musculatura en el tren posterior y caderas con huesos adicionales que articulaban las extremidades posteriores con el tronco, lo que les permitió correr aún más deprisa que otros arcosaurios.

Aun así, los primeros dinosauromorfos no eran temibles. Los restos fosilizados revelan la talla de un gato, con extremidades largas y delgadas. Y no eran abundantes, ya que menos del 5 por ciento de las huellas descubiertas en Stryczowice pertenecen a *Prorotodactylus*, porcentaje que las de otros pequeños reptiles y anfibios e incluso otros arcosaurios superan con creces. No había llegado la hora de los dinosauromorfos.

LOS PRIMEROS DINOSAURIOS

Durante los siguientes 10 o 15 millones de años los dinosauromorfos prosiguieron su proceso de diversificación. El registro fósil de ese período muestra un número creciente de tipos de huellas en Polonia y, más tarde, en otros lugares del mundo. Las pistas aumentaron sus dimensiones y adquirieron mayor variedad de formas. Algunas ya no muestran impresiones de las extremidades anteriores, señal de que los animales que las dejaron caminaban únicamente con las posteriores. También empiezan a aparecer esqueletos. En ese momento, hace entre 240 y 230 millones de años, uno de los linajes de los dinosauromorfos inició su transformación en verdaderos dinosaurios. Este cambio, que de radical solo tuvo el nombre, implicó solo pequeñas innovaciones anatómicas: una larga cresta ósea en la parte superior del brazo que facilitaba la inserción de músculos más voluminosos, apófisis con forma de pestaña en las vértebras cervicales para sostener unos ligamentos más fuertes, y, por último, una articulación perforada con forma de cavidad donde el hueso del muslo encajaba con la pelvis que confería más estabilidad a la postura erguida. Pequeños como eran, esos cambios marcaron el comienzo de algo realmente importante.

Los fósiles más antiguos de dinosaurios datan de hace unos 230 millones de años y proceden de ambientes muy diversos ubicados en el Parque Provincial de Ischigualasto, en Argentina.

Hace décadas que se desentierran en ese yacimiento, cuyo pionero fue el legendario paleontólogo estadounidense Alfred Romer en los años cincuenta, secundado por los argentinos Osvaldo Reig y José Bonaparte en los sesenta. En fecha más reciente, Paul Sereno, de la Universidad de Chicago, y Ricardo N. Martínez, de la Universidad Nacional de San Juan, han dirigido expediciones a Ischigualasto en los ochenta y noventa. Entre los especímenes figuran algunos pertenecientes a *Herrerasaurus*, *Eoraptor* y otros representantes de las tres grandes ramas de dinosaurios: los terópodos, carnívoros; los cuellilargos sauropodomorfos, herbívoros; y los ornitisquios, picudos y herbívoros también.

Hacia la mitad del Triásico, entre 230 y 220 millones de años atrás, los tres grupos ya habían aparecido: todos se preparaban para engendrar sus célebres descendientes en un mundo que a duras penas reconoceríamos. Un único supercontinente llamado Pangea se extendía de polo a polo, rodeado por un océano llamado Panthalassa. No era un lugar acogedor. El planeta era mucho más cálido y, como Pangea se encontraba centrado en el ecuador, la mitad de la tierra firme era tórrida en verano, mientras que la otra mitad era más fría en invierno. Esas acusadas diferencias térmicas alimentaban violentos «megamonzones» que dividían Pangea en provincias ambientales caracterizadas por distintos grados de precipitación y de viento. La región ecuatorial era sofocante y bochornosa, flanqueada por desiertos subtropicales en ambos hemisferios. Las regiones de latitud media eran ligeramente más frescas, pero mucho más húmedas.

Herrerasaurus, *Eoraptor* y los otros dinosaurios de Ischigualasto habitaban en las latitudes medias, algo más hospitalarias. Lo mismo hacían sus semejantes de Brasil y la India, donde hace poco han tenido lugar importantes descubrimientos. Pero ¿qué sucedía en las demás regiones del supercontinente? ¿Fueron capaces los primeros dinosaurios de colonizar esas regiones inhóspitas, tal y como apunta la visión clásica? En 2009, meses después de nuestra primera expedición a Polonia, Butler y yo nos asociamos con Octávio Mateus, del Museo de Lourinhã, para comprobar esa hipótesis explorando unos depósitos geológicos pertenecientes al cinturón árido subtropical del hemisferio norte de Pangea, en el sur del Portugal actual. Esperábamos hallar fósiles de dinosaurios, pero en cambio descubrimos un gran cementerio con cientos de anfibios de la talla de un pequeño utilitario que asignamos a una especie nueva: *Metoposaurus algarvensis*. Estos señores de los lagos y ríos del Triásico habían sido víctimas de un cambio anormal en el caprichoso clima de Pangea que probablemente desecó los lagos. Volvimos más tarde para excavar el lecho de huesos y descubrimos fósiles de varios tipos de peces, reptiles del tamaño de un caniche y arcosaurios del linaje que condujo a los cocodrilos. Hasta hoy, no se ha desenterrado un solo fragmento de dinosaurio.

Probablemente nunca daremos con ellos. España, Marruecos y la costa atlántica de Norteamérica cuentan con magníficos yacimientos que albergan fósiles de ese período, de entre 230 y 220 millones de años, que evidencian la misma tónica que en Portugal: anfibios y reptiles por doquier, pero ni un dinosaurio. Todos se sitúan en las regiones áridas de Pangea e indican que durante los primeros años de su evolución los dinosaurios se diversificaron lentamente en las regiones templadas y húmedas, pero parece que fueron incapaces de colonizar los desiertos. Es un giro inesperado: lejos de ser los animales superiores que conquistaron toda Pangea desde su aparición, no soportaban el calor. Su distribución geográfica era más restringida y su dominio mucho más exiguo, pues trataban de sobrevivir en un mundo que aún se recuperaba de la gran extinción del final del Pérmico.

CONTRASTE DE HIPÓTESIS

Disputa familiar

Tal vez el debate más candente que domina en la investigación sobre los dinosaurios versa sobre el lugar que ocupan en el árbol genealógico los terópodos, los sauropodomorfos y los ornitisquios. En 1887, el paleontólogo británico Harry Govier Seeley examinó gran cantidad de restos fósiles de Europa y del oeste de EE.UU. y concluyó que los dinosaurios podían dividirse en dos grandes familias, según la anatomía de los huesos de la cadera. En los terópodos y los sauropodomorfos el hueso del pubis apunta hacia adelante, como en los lagartos actuales, así que los clasificó en el grupo de los saurisquios, que significa «pelvis de lagarto». En cambio, el pubis de los ornitisquios se proyecta hacia atrás, como en las aves modernas, de ahí el nombre del grupo: los dotados con «pelvis de pájaro». Esa dicotomía persiste como la clasificación básica de los dinosaurios que todos los expertos aprendimos como estudiantes de paleontología.

Sin embargo, este esquema podría ser incorrecto. En un estudio demoledor publicado en *Nature* a principios del año pasado, el doctorando de la Universidad de Cambridge Matthew Baron y sus colaboradores presentaron una nueva genealogía fundamentada en un análisis de datos muy extenso que abarcaba dinosaurios primitivos y sus rasgos anatómicos. Su árbol reúne a terópodos y ornitisquios en el nuevo grupo de los ornitoscélidos, mientras que los sauropodomorfos quedan en una rama aparte. En lugar de saurisquios y ornitisquios, la nueva dicotomía de los dinosaurios consistiría en ornitoscélidos y sauropodomorfos.

O quizá no. Poco después de que se publicara el estudio de Baron, contactó conmigo mi colega brasileño Max C. Langer, que durante la última década ha descrito gran cantidad de nuevos dinosauromorfos del Triásico y ha estudiado dinosaurios de ese país, entre ellos a *Ixalerpeton* (un precursor de los dinosaurios muy similar a *Prorotodactylus*, el autor de las huellas de Polonia) y *Saturnalia* (un protosauropodomorfo del tamaño de un perro). Dudaba de la nueva genealogía y reunió a un nutrido equipo de expertos en dinosaurios arcaicos para examinar minuciosamente los datos de Baron. Langer me pidió que me sumara, a raíz de mis estudios sobre las huellas de Polonia y otros fósiles notables del Triásico. Durante un mes revisamos los datos y descubrimos discrepancias en la forma en que el equipo de Langer había tratado ciertas características. Tras modificar los datos con nuestras correcciones volvimos a ejecutar el análisis. El árbol genealógico resultante volvió a situar a los saurisquios y los ornitisquios, si bien las pruebas estadísticas no mostraron que esa disposición fuese sustancialmente mejor que el esquema de ornitoscélidos y sauropodomorfos de Baron y su equipo. Publicamos esos resultados en *Nature* en otoño de 2017.

Esa ambigüedad denota que los paleontólogos no estamos seguros de la forma básica del árbol de los dinosaurios. Parece que los últimos descubrimientos acaecidos en Argentina, Brasil, Polonia y otros lugares en los últimos 15 años han enturbiado la imagen. Ahora sabemos que los primeros miembros de los tres grandes linajes de dinosaurios eran notablemente similares en tamaño y anatomía, lo que dificulta trazar los vínculos. Quizá la próxima generación de paleontólogos pueda resolver el rompecabezas, probablemente de la forma en que se suelen zanjar esas controversias en nuestra disciplina: con nuevos fósiles.

FUENTES: «UNTANGLING THE DINOSAUR FAMILY TREE», POR MAX C. LANGER ET AL. EN *NATURE*, VOL. 551. PUBLICADO EN LÍNEA EL 1 DE NOVIEMBRE, 2017; «BARON ET AL. REPLY», POR MATTHEW G. BARON ET AL. EN *NATURE*, VOL. 551. PUBLICADO EN LÍNEA EL 1 DE NOVIEMBRE DE 2017; PORTIA SLOAN ROLLINGS (*ilustraciones*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

ORNITISQUIOS

Pisanosaurus
Heterodontosaurus
Manidens
Tianyulong
Abrictosaurus
Fruitadens haagarorum
Eocursor
Lesothosaurus
Agilisaurus
Jeholosaurus
Hexinlusaurus
Emausaurus
Scelidosaurus
Scutellosaurus
Laquintasaura

Guaibasaurus
Daemonosaurus
Eodromaeus
Agnosphitys
Staurikosaurus
Sanjuansaurus
Herrerasaurus

TERÓPODOS

Tawa
Chindesaurus
Dracovenator
Panguraptor
Zupaysaurus
«Syntarsus»
Dracoraptor
Procompsognathus
Coelophysis
Sarcosaurus
Liliensternus
Lophostropheus
Dilophosaurus
Sinosaurus
Cryolophosaurus ellioti
Allosaurus
Piatnitzkysaurus
Elaphrosaurus
Ceratosaurus
Eoabelisaurus

SAUROPODOMORFOS

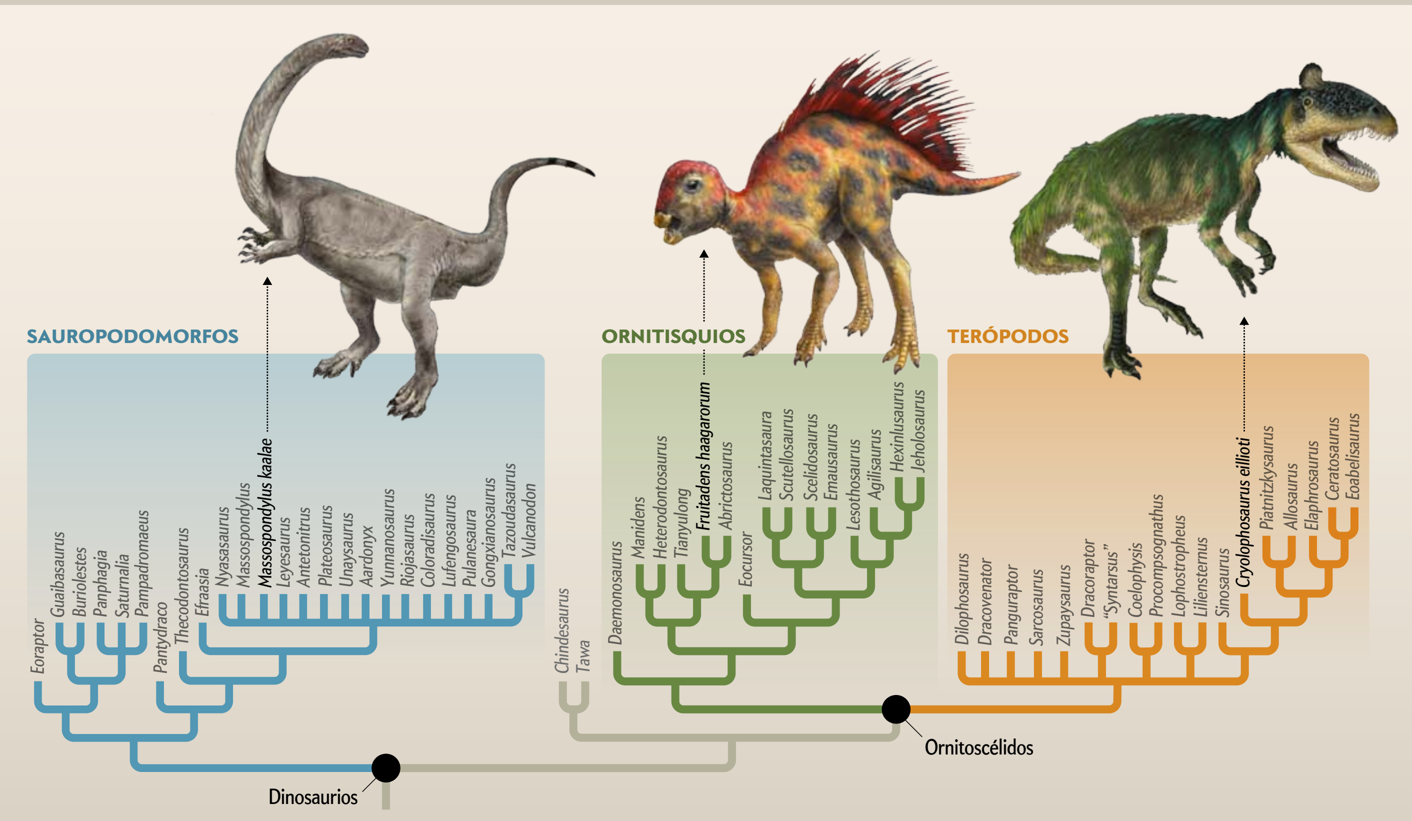
Eoraptor
Saturnalia
Panphagia
Pampadromaeus
Buriolestes
Pantydraco
Thecodontosaurus
Efraasia
Gongxianosaurus
Pulanesaura
Lufengosaurus
Coloradisaurus
Riojasaurus
Yunnanosaurus
Aardonyx
Unaysaurus
Plateosaurus
Antetonitrus
Leyesaurus
Massospondylus kaalae
Massospondylus
Nyasasaurus
Vulcanodon
Tazoudasaurus

Saurisquios

Dinosaurios

Esquema clásico

Durante mucho tiempo los paleontólogos han dividido los dinosaurios en ornitisquios, de pelvis similar a la de los pájaros, y en saurisquios, con pelvis similar a la de los lagartos, que engloban los terópodos y los sauropodomorfos.

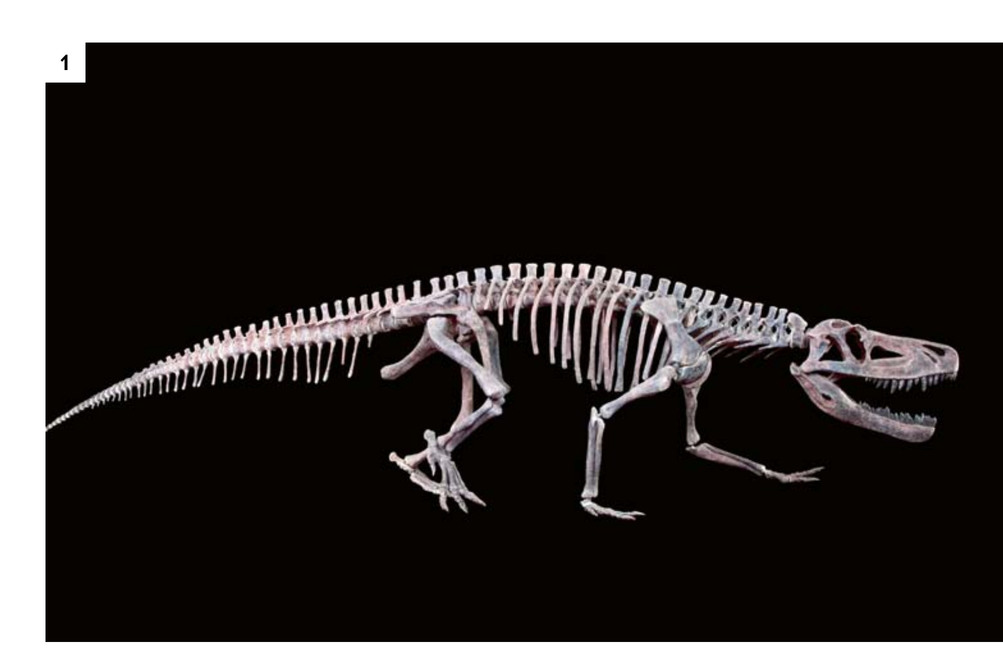


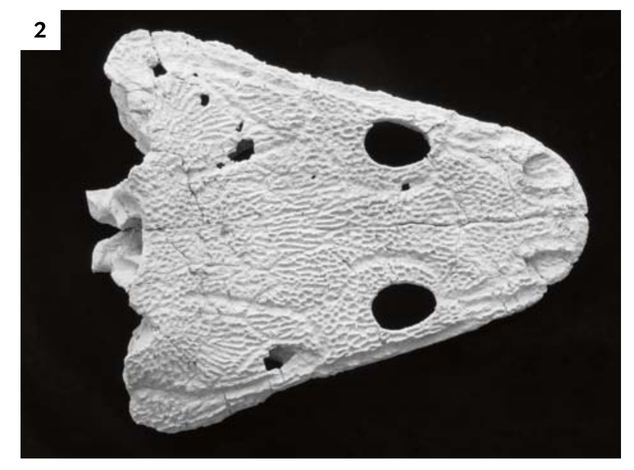
Hipótesis nueva

Un estudio reciente sobre las características de los dinosaurios concluye que los terópodos y los ornitisquios conformarían el grupo de los ornitoscélidos y sitúa a los sauropodomorfos en una rama separada.

Entonces, justo cuando parecía que serían eternos segundones, la suerte cambió. Primero, los herbívoros dominantes en las regiones húmedas (el grupo reptiliano de los rincosaurios y unos parientes arcaicos de los mamíferos, los dicinodontes) entraron en declive y desaparecieron de algunas regiones por razones desconocidas. Esa extinción, hace entre 225 y 215 millones de años, supuso una oportunidad para que los sauropodomorfos herbívoros reclamaran su nicho ecológico, como *Saturnalia* (del tamaño de un perro y cuello ligeramente alargado). En poco tiempo, esos saurópodos primitivos se convirtieron en los herbívoros dominantes en las regiones húmedas de ambos hemisferios. Y segundo, hace unos 215 millones de años, los dinosaurios pudieron dispersarse por los desiertos del hemisferio norte. Probablemente, cambios en los monzones y en la concentración atmosférica de CO_2 redujeron el contraste entre las regiones húmedas y áridas, lo que facilitó la migración de los dinosaurios.

Aun así, el camino por recorrer era largo. El mejor registro fósil de esos primeros dinosaurios desertícolas procede de zonas que hoy vuelven a ser desiertos, en las rojizas tierras baldías del suroeste de EE.UU. Hace más de una década que un equipo de jóvenes investigadores excava metódicamente la cantera Hayden, un rico enclave fosilífero cerca de donde la artista Georgia O'Keeffe tenía su amado retiro de Rancho Fantasma, en Nuevo México. Randall Irmis, de la Universidad de Utah, Sterling Nesbitt, de Virginia Tech, Nathan Smith, del Museo de Historia Natural del Condado de Los Ángeles, Alan Turner, de la Universidad Stony Brook, y Jessica Whiteside, de la Universidad de Southampton, han descubierto una soberbia colección de esqueletos: anfibios monstruosos afines al *Metoposaurus* luso, parientes arcaicos de los cocodrilos y multitud de curiosos reptiles acuáticos y arborícolas. ¿Hay dinosaurios en la cantera? Sí, pero son minoría: solo algunos terópodos carnívoros, representados por contados especímenes. Ni rastro de grandes herbívoros, esos titanes cuellilargos tan comunes en las zonas húmedas, ni de los antepasados ornitisquios de *Triceratops*. El equipo argumentó que, una vez más, la escasez era consecuencia del clima: esos desiertos eran ambientes inestables con temperaturas y lluvias fluctuantes, asolados por incendios durante una parte del año y tormentas torrenciales durante la otra. La vegetación no podía crear comunidades estables que constituyeran una despensa fiable para los herbívoros. En suma, al cabo de 20 millones de años de su aparición, y pese a haber asumido el papel de grandes herbívoros en los ecosistemas húmedos e iniciado la colonización de los desiertos tropicales, los dinosaurios distaban de ser hegemónicos.





DURA COMPETENCIA: durante gran parte del Triásico, los dinosaurios fueron un grupo marginal, eclipsado por los antepasados de los cocodrilos, como *Saurosuchus* (*1*), y por anfibios gigantes, como *Metoposaurus* (*2*).

RICARDO N. MARTÍNEZ, INSTITUTO Y MUSEO DE CIENCIAS NATURALES, UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN (1); TOMASZ SULEJ, INSTITUTO DE PALEOBIOLOGÍA, ACADEMIA POLACA DE CIENCIAS (2)

COMPETICIÓN DE COCODRILOS

No importa qué parte del Triásico se examine, desde la aparición de los primeros dinosaurios, hace 230 millones de años, hasta el final del período, 29 millones de años después, la historia es la misma. Solo algunos dinosaurios pudieron habitar ciertas regiones, y dondequiera que lo hicieran, en los bosques húmedos o en los desiertos, siempre estuvieron rodeados por una fauna más extensa, abundante y diversa. Por ejemplo, en Ischigualasto, los dinosaurios más antiguos constituían solo entre el 10 y el 20 por ciento de la fauna. Algo similar ocurre en Brasil y, millones de años después, en la cantera Hayden. En todos esos ejemplos, eran ampliamente superados en número por antepasados de los mamíferos, anfibios gigantes y reptiles extraños.

Pero, por encima de todo, los dinosaurios del Triásico estaban siendo superados por unos parientes cercanos llamados pseudosuquios, el grupo de los arcosaurios del que descienden los cocodrilos. En Ischigualasto, un arcosaurio de ese linaje, *Saurosuchus*, de fauces temibles, ocupaba la cúspide de la pirámide alimentaria. En la cantera Hayden vivieron numerosos pseudosuquios: unos eran semiacuáticos y estaban dotados de hocicos prominentes; otros eran acorazados y herbívoros; incluso había algunos desdentados que corrían sobre sus patas traseras y tenían un parecido sorprendente con ciertos terópodos coetáneos.

Muchos de esos fósiles salieron a la luz durante mis años de máster, a finales de la década de 2000: semejante patrón me pareció peculiar. En aquel momento, mientras seguía con interés

la avalancha de nuevos hallazgos, empecé a leer estudios clásicos de paleontólogos eminentes, como Robert Bakker y Alan Charig, donde argumentaban vehementemente que los dinosaurios estaban tan perfectamente adaptados, eran tan veloces, vigorosos e inteligentes, que en poco tiempo desbancaron a sus primos cocodrilos y a los demás competidores del Triásico. Pero esa idea no parecía concordar con el registro fósil. ¿Habría algún modo de comprobarlo?

Después de empaparme de la bibliografía sobre estadística, descubrí que, dos décadas antes, unos paleontólogos que estudiaban animales invertebrados habían ideado un método para medir la diversidad anatómica en un grupo zoológico, método que había sido ignorado por los investigadores de dinosaurios. El parámetro se llama disparidad morfológica. Si se pudiese determinar la disparidad de los dinosaurios y los pseudosuquios durante el Triásico, podría saber si adquirieron o perdieron diversidad y con qué velocidad, e inferir de ello si alcanzaron el éxito de forma gradual o abrupta, y si un grupo aventajaba al otro.

En colaboración con Michael Benton, Marcello Ruta y Graeme Lloyd, mis supervisores en la Universidad de Bristol, reuní un gran conjunto de datos de dinosaurios y pseudosuquios del Triásico y evalué más de 400 características de su anatomía. Cuando sometimos los datos al análisis estadístico, hallamos un resultado sorprendente que publicamos en 2008 en *Science*. A lo largo del Triásico, los pseudosuquios mostraron una diversidad anatómica sustancialmente mayor que los dinosaurios, de lo cual se deduce que presentaban una alimentación y comportamientos más variados. Ambos grupos se diversificaron a lo largo del período, pero los pseudosuquios siempre aventajaron a los dinosaurios. En contra del postulado clásico, que encumbraba a estos frente a unos rivales netamente inferiores, en realidad estuvieron perdiendo la batalla frente a los primeros durante gran parte de su larga coexistencia.

CARPE DIEM

El análisis estadístico nos llevó a una conclusión iconoclasta: los primeros dinosaurios no destacaron por nada en especial, al menos si los comparamos con la variada fauna que vagaba a su lado durante el Triásico. Si fuera posible viajar al pasado para observar Pangea, seguramente llegaríamos a la conclusión de que eran bastante marginales. Y si hubiésemos jugado a las apuestas con el grupo zoológico que adquiriría tallas colosales y dominaría el planeta, lo más seguro es que hubiésemos apostado por otro, probablemente por los tan diversos pseudosuquios. Pero, por supuesto, sabemos que fueron ellos los que ganaron la partida y que hoy perviven bajo la forma de 10.000 especies de aves. En cambio, apenas dos docenas de cocodrilos sobreviven en nuestros días.

¿Cómo es posible que los dinosaurios arrebatasen la corona a ese linaje antecesor de los cocodrilos? El factor decisivo parece haber sido otro golpe de suerte que ninguno pudo controlar. A finales del Triásico, los movimientos tectónicos estiraron Pangea desde el este y el oeste y acabaron desgarrando el supercontinente. Hoy en día, el océano Atlántico llena la brecha, pero entonces se abrió una enorme grieta por donde manó el magma. Por espacio de más de medio millón de años, coladas gigantescas de lava cubrieron gran parte del centro de Pangea, de modo muy similar a como lo hicieron las cataclísmicas erupciones que cerraron el Pérmico 50 millones de años antes. De ese modo, al final del Triásico sobrevino otra extinción masiva. Los arcosaurios del linaje de los cocodrilos fueron diezmados y solo sobrevivieron un puñado de especies: los antepasados de los cocodrilos y los caimanes actuales.

En cambio, parece que los dinosaurios apenas notaron ese baño de fuego y azufre. Todos sus grandes grupos, los terópodos, los sauropodomorfos y los ornitisquios, sobrevivieron para emprender el siguiente período geológico, el Jurásico. Aunque el mundo se había convertido en un infierno, prosperaron y de alguna manera sacaron rédito del caos desatado a su alrededor. Nos podemos preguntar si algún rasgo especial les otorgó ventaja sobre los pseudosuquios, o si simplemente fueron más afortunados y escaparon indemnes del cataclismo por puro azar, cuando tantos otros perecieron. Me gustaría tener una respuesta, pero ese enigma es algo que deberá resolver la próxima generación de paleontólogos.

Cualquiera que sea la razón por la que los dinosaurios sobrevivieron a la catástrofe, es fácil vislumbrar las consecuencias. Una vez que superaron los escollos y se zafaron del yugo impuesto por sus rivales los pseudosuquios, pudieron prosperar durante el Jurásico. Ganaron en diversidad, abundancia y tamaño. Nacieron nuevas especies y migraron a todas las regiones, hasta ocupar un lugar preeminente en los ecosistemas terrestres del globo. Entre los recién llegados destacaban los primeros dinosaurios provistos de placas en el lomo y corazas corporales; los primeros saurópodos colosales que hacían temblar el suelo a su paso; carnívoros antepasados de *T. rex* que comenzaron a crecer sin freno; y otro grupo de terópodos que empezó a empequeñecer, alargar sus brazos y cubrirse con plumas, los antecesores de las aves. Los dinosaurios se convirtieron en los reyes. Tardaron más de 30 millones de años pero, al fin, ocuparon el trono. IyC

PARA SABER MÁS

The origin and early radiation of dinosaurs. Stephen L. Brusatte et al. en *Earth-Science Reviews*, vol. 101, n.os 1-2, págs. 68-100, julio de 2010.

Footprints pull origin and diversification of dinosaur stem lineage deep into early Triassic. Stephen L. Brusatte, Grzegorz Niedźwiedzki y Richard J. Butler en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 278, págs. 1107-1113, 7 de abril de 2011.

Untangling the dinosaur family tree. Max C. Langer et al. en *Nature*, vol. 551. Publicación digital el 1 de noviembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Origen de los dinosaurios. Fernando E. Novas en *IyC*, octubre de 1994.

El triunfo de los titanes. K. A. Curry Rogers y M. D. D'Emic en *IyC*, septiembre de 2012.

Orígenes de los tiranosaurios. Stephen Brusatte en *IyC*, julio de 2015.



ASTRONOMÍA

La reciente posibilidad de estudiar los mismos eventos astronómicos mediante luz, partículas y ondas gravitacionales, **una combinación llamada «astronomía de multimensajeros»,** está permitiendo obtener una imagen mucho más completa de algunos de los fenómenos más misteriosos del universo

Mensajeros celestes

Ann Finkbeiner

Ilustración de Maria Corte Maidagan

Ann Finkbeiner es periodista científica especializada en astronomía, cosmología y la confluencia entre ciencia y seguridad nacional.



El 22 de septiembre de 2017, a las 16:54 según la hora de la costa este de EE.UU., un neutrino impactó contra los detectores de IceCube, un gigantesco experimento enterrado bajo el hielo de la Antártida. Su energía superaba los 100 teraelectronvoltios, unas diez veces más de lo que puede lograr el acelerador de partículas más potente del planeta. Treinta segundos después, IceCube enviaba una alerta que indicaba la energía del neutrino, el momento de su llegada y la dirección aproximada del cielo desde la que provino.

En la Universidad de Maryland en College Park, el investigador Erik Blaufuss, miembro de IceCube, recibió la alerta en un mensaje de texto. Al verla supo que, con esa energía, la partícula probablemente hubiese llegado desde más allá del sistema solar. En el último año Blaufuss ya había visto unos diez neutrinos con energías similares, pero pensó que igualmente merecía la pena difundirlo. A las 20:09 publicó un aviso sobre la partícula, hoy conocida como IceCube-170922A, en una de las redes de alerta usadas por los astrónomos. Los más de 5000 sensores de IceCube, diseñados para detectar los destellos que se generan cada vez que un neutrino interacciona con los átomos del hielo, permiten rastrear la zona del cielo desde la que proviene la partícula. Blaufuss esperaba que aquel aviso nocturno sorprendiese a los astrónomos trabajando y los incitase a estudiar esa región del firmamento. Con suerte, podrían descubrir la galaxia u objeto celeste que emitió el neutrino.

Los neutrinos son solo una de las muchas señales físicas provenientes del firmamento. Durante largo tiempo, los astrónomos se han visto obligados a estudiar exclusivamente la luz. Hace unos treinta años, sin embargo, comenzaron a detectarse los primeros neutrinos. Y, desde 2015, es posible observar también ondas gravitacionales. Con todo, combinar diferentes señales para analizar un mismo fenómeno, una técnica conocida como «astronomía de multimensajeros», constituye un avance relativamente reciente.

Una gran ventaja de la astronomía de multimensajeros reside en que, a diferencia de lo que ocurre con la luz (una onda electromagnética que puede ser reflejada, absorbida y desviada), no existe prácticamente nada que pueda detener las ondas gravitacionales o los neutrinos. La información que transportan es pura: llega directamente desde la fuente y a una velocidad igual o muy cercana a la de la luz. Otra ventaja de estas señales se debe a que los misteriosos fenómenos que las generan —colisiones entre agujeros negros, explosiones de supernova o fusiones de estrellas de neutrones— son breves y terriblemente violentos. Habían sido predichos pero no vistos, o bien vistos pero no entendidos. Ahora, con más señales a su disposición, los astrónomos pueden finalmente comprenderlos. «Estas fuentes son complejas», explica Francis Halzen, físico de la Universidad de Wisconsin-Madison e investigador principal de IceCube. «No es posible entenderlas a menos que dispongamos de varias maneras de estudiarlas.»

LA FUENTE DE TEXAS

Cuatro días después de que Blaufuss enviara el aviso de IceCube, el observatorio Swift, un telescopio espacial de rayos X, detectó nueve objetos en la misma área del cielo de la que provino IceCube-170922A.

Dos días más tarde, el 28 de septiembre a las 06:10, el telescopio espacial de rayos gamma Fermi observó una fuente en la zona del cielo asociada a IceCube-170922A y al segundo de los objetos referidos por Swift. Sara Buson, miembro del equipo de Fermi en el Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, y sus colaboradores enviaron un aviso público en el que aclaraban que esa fuente de rayos gamma ya era conocida y se llamaba TXS 0506+056, aunque más tarde los astrónomos la apodarían «fuente de Texas». «Fue muy emocionante», explica Buson. «El neutrino estaba exactamente sobre la fuente de rayos gamma; era la primera vez que observábamos una coincidencia tan afortunada.» En las dos semanas anteriores, Fermi había visto que la intensidad del objeto había aumentado en un factor de seis.

El mismo día, a las 14:00, los científicos de la misión ASAS-SN, que opera en longitudes de onda visibles, anunciaron que el brillo de la fuente de Texas había estado creciendo durante los 50 días previos hasta llegar al mayor alcanzado en años. Y un día después, el 29 de septiembre a las 09:00, otro telescopio óptico descubrió que la fuente de Texas era un blázar: un agujero negro supermasivo en el centro de una galaxia distante, el cual estaba emitiendo un chorro de partículas en dirección a la Tierra y experimentando fulguraciones esporádicas a medida que la materia caía en su interior. Más tarde, el 17 de octubre, el

EN SÍNTESIS

Dos eventos recientes han inaugurado la era moderna de la «astronomía de multimensajeros», la técnica consistente en observar los mismos fenómenos celestes mediante luz, partículas y ondas gravitacionales.

Cada uno de esos mensajeros transporta información única. Combinar los diferentes datos que aporta cada uno está permitiendo a los astrónomos entender mejor algunos de los fenómenos más misteriosos del cosmos.

En el último año se han detectado los neutrinos y la luz procedentes de un agujero negro supermasivo que absorbe materia, así como las ondas gravitacionales y la luz generadas por una colisión entre estrellas de neutrones.



BAJO EL HIELO DEL POLO SUR se esconden los miles de sensores del observatorio de neutrinos IceCube. Estos han sido diseñados para detectar las raras ocasiones en las que un neutrino interacciona con los átomos del hielo. En 2017, un neutrino de alta energía desencadenó una serie de observaciones desde telescopios terrestres y espaciales para identificar la fuente de la partícula.

conjunto de telescopios VLA de Nuevo México, un observatorio que opera en longitudes de onda de radio, confirmó que la luz provenía del chorro de un blázar.

Los blázares ya se conocían bien; sin embargo, nunca se habían observado en múltiples longitudes de onda e identificado simultáneamente como fuente de neutrinos. Además, aquella fue la primera ocasión en que un neutrino de alta energía coincidía en el espacio y el tiempo con un fotón de rayos gamma de una energía similar. Halzen señala que, en todo el cielo, el número de neutrinos de alta energía es aproximadamente igual al de fotones de rayos gamma, por lo que lo más lógico es pensar que se trate de las mismas fuentes. La similitud entre ambos números, añade Imre Bartos, físico de la Universidad de Florida, constituye una «coincidencia notable y sugerente». Pero la implicación de que provienen de los mismos objetos cósmicos, los blázares, «es una gran extrapolación», advierte Halzen. En cualquier caso, el descubrimiento de IceCube-170922A podría ayudar a distinguir entre las diferentes teorías que tratan de explicar cómo aceleran los blázares los chorros de partículas hasta energías tan elevadas. «Es un buen primer paso, pero necesitamos más observaciones de multimensajeros», matiza Bartos.

UNA LARGA ESPERA

Los primeros mensajeros cósmicos distintos de la luz fueron los neutrinos. En febrero de 1987 se observaron los emitidos en la explosión de supernova 1987A: una estrella moribunda cuyo núcleo colapsó bajo su propia gravedad y luego explotó. En total, se detectaron 25 de estas partículas en Japón, EE.UU. y la Unión Soviética. Tres horas después llegó la luz visible generada por la onda de choque que atravesó la superficie del astro. En noviembre se observaron los rayos X y gamma generados por la desintegración de los elementos radiactivos producidos en el estallido, así como la luz infrarroja emitida por los nuevos elementos pesados que también se formaron en él. La supernova 1987A ayudó a los astrónomos a entender cómo se producen estas explosiones, señala Doug Cowen, físico de la Universidad Estatal de Pensilvania que forma parte del equipo de IceCube. De hecho, dejó claro que la mayor parte de la energía de la explosión se emite en forma de neutrinos. Pero eso fue hace 30 años, «y hemos estado esperando desde entonces», apunta Halzen. La coincidencia del neutrino IceCube-170922A con la fuente de Texas, que acabaría siendo observada por al menos 19 instrumentos en rayos gamma, rayos X, luz visible y ondas de radio, se ha convertido en el segundo evento cósmico de multimensajeros en el que intervienen los neutrinos.

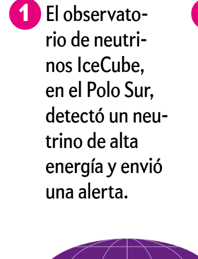
Sin embargo, aunque los neutrinos puedan ser excelentes mensajeros, los más extravagantes de todos son las ondas gravitacionales. Durante un siglo no fueron más que una predicción teórica de la relatividad general de Einstein. Esta explica la atracción entre dos masas (como una manzana y la Tierra) a partir de la hipótesis de que toda materia curva el espaciotiempo circundante. Por tanto, cuando una masa se acelera, ese cambio en la curvatura se propaga hacia el exterior en forma de ondas, las cuales no son más que el propio espaciotiempo encogiéndose y estirándose. Si una onda gravitacional atravesara el cuerpo de una persona, esta sería primero «más alta y más delgada, y luego más baja y ancha», explica Szabolcs Marka, físico de la Universidad de Columbia.

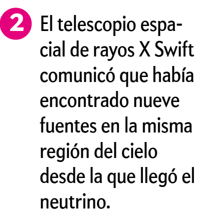
La relatividad general es una teoría ampliamente aceptada. De hecho, y si bien de manera indirecta, los científicos ya habían detectado la curvatura del espaciotiempo que la teoría predice para cuerpos como estrellas y galaxias. No obstante, hasta hace poco nadie había logrado observar ondas gravitacionales de forma directa. En 2014 concluyeron varios trabajos de mejora en el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO). Este consta de dos interferómetros independientes situados en sendos extremos de EE.UU., cada uno de los cuales se compone de dos brazos de unos 4 kilómetros de longitud dispuestos en ángulo recto. Desde un extremo de cada brazo se dispara un rayo láser; este rebota en un espejo situado en el otro extremo, regresa y se mide el tiempo de viaje. Una onda gravitacional que pase por el detector contraerá y estirará los brazos, lo que modificará el tiempo de viaje de los rayos láser en una parte en 10^{21}. En un brazo de 4 kilómetros, eso corresponde a un cambio de longitud del orden de la milésima parte del tamaño de un protón.

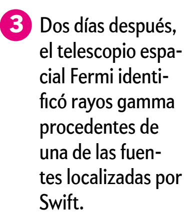
DETECCIÓN MÚLTIPLE

Cadena de acontecimientos cósmicos

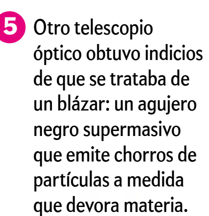
Durante tres semanas y media de 2017, los astrónomos observaron el mismo fenómeno —lo que pareció ser una fulguración causada por un agujero negro supermasivo que está engullendo materia— mediante luz de varias longitudes de onda y también mediante neutrinos. Esta combinación de señales astronómicas tan diferentes está permitiendo entender varios fenómenos que hasta ahora eran insondables.

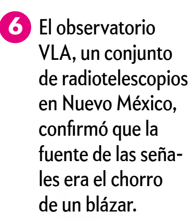


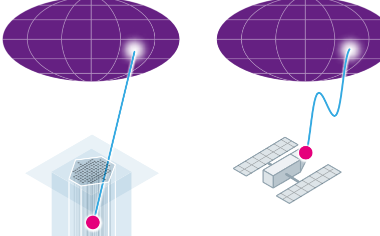
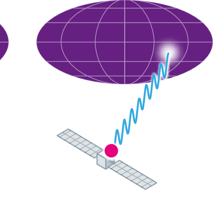
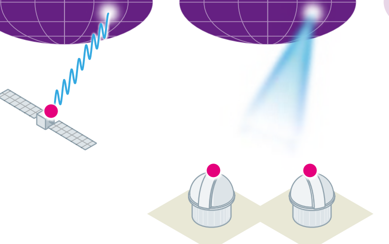
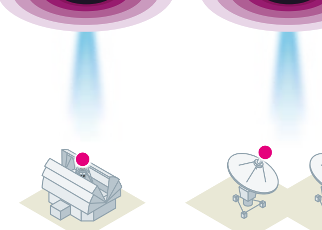



















Incluso con esa precisión, LIGO solo puede detectar las ondas procedentes de fuentes muy densas y masivas, como agujeros negros o estrellas de neutrones. Y aunque su resolución angular (la capacidad para situar fuentes en la bóveda celeste) es la máxima que puede alcanzar un experimento de este tipo, sigue siendo muy deficiente. La incorporación de Virgo, un tercer interferómetro emplazado en Italia, permite localizar la fuente con una precisión de decenas de grados (la luna llena abarca unos 0,5 grados). Para un astrónomo, explica Andy Howell, de la Universidad de California en Santa Bárbara, eso es como agitar la mano hacia el cielo y decir «probablemente esté por ahí»..

Entre el 14 de septiembre de 2015 y el 14 de agosto de 2017, la colaboración LIGO-Virgo detectó cinco fuentes de ondas gravitacionales. En todos los casos se trató de la colisión de dos agujeros negros y su posterior fusión en uno solo. Tales observaciones fueron memorables por cuanto supusieron las primeras detecciones directas de ondas gravitacionales; sin embargo, no permitieron hacer astronomía de multimensajeros. Los agujeros negros son tan densos que la luz no puede escapar de ellos, por lo que su fusión solo puede detectarse a través de ondas gravitacionales. Nadie esperaba ver luz o neutrinos procedentes de aquellas colisiones. Y ningún detector lo hizo, a pesar de que había muchos observando.

CHOQUE CÓSMICO

Entonces, tan solo tres días después de la última colisión de agujeros negros, tuvo lugar un evento que se ha convertido en el emblema de la astronomía de multimensajeros. El 17 de agosto de 2017, las colaboraciones LIGO y Virgo volvieron a detectar ondas gravitacionales. Y, tan solo 1,74 segundos después, el telescopio Fermi observó un estallido de rayos gamma en la misma zona del cielo. El evento, bautizado GW170817, no parecía corresponder a la colisión y fusión de dos agujeros negros, sino a la de dos estrellas de neutrones.

Las estrellas de neutrones son el núcleo que sobrevive tras una explosión de supernova. Son tan densas que sus protones y electrones se han combinado en neutrones. Constituyen el estadio final de aquellas estrellas que no son lo suficientemente densas para formar agujeros negros. Las ondas gravitacionales detectadas por LIGO y Virgo se habrían generado mientras ambos astros orbitaban en espiral uno alrededor del otro justo antes de chocar. Por su parte, el estallido de rayos gamma se habría producido tras su violenta fusión, «cuando todo se descontrola», en palabras de Peter Mészáros, astrónomo de la Universidad Estatal de Pensilvania.

Durante las siguientes 24 horas fue «como si hubieran tirado carne cruda en una fosa con osos», apunta M. Coleman Miller, de Maryland: telescopios de todas las frecuencias, tanto desde tierra como desde el espacio, compitieron para observar la señal. Determinaron que la fusión se había producido en una galaxia cercana llamada NGC 4993 y vieron cómo la mayoría de la luz generada en el cataclismo se desvanecía de inmediato.

La luz infrarroja, sin embargo, siguió aumentando de intensidad hasta el tercer día: una señal de que, al fusionarse, los astros expulsaron restos donde se estaban formando elementos

NIGEL HAWTIN

químicos pesados. Durante las semanas siguientes, los rayos X y las ondas de radio también se intensificaron, lo que significaba que un chorro de partículas con velocidades cercanas a la de la luz se estaba abriendo paso a través del material expelido en el choque. Sin embargo, no se detectó ningún neutrino, lo que probablemente se debiese a que el chorro de partículas no apuntaba directamente hacia la Tierra. Halzen asegura que, de haberse dirigido hacia nuestro planeta, los detectores de neutrinos los habrían visto. En conjunto, los mensajeros constituían la prueba de un fenómeno predicho pero nunca antes visto, y aún menos observado en tiempo real: la colisión explosiva de dos estrellas de neutrones. Este proceso se conoce como «kilonova», y su resultado final puede ser otra estrella de neutrones, una estrella de neutrones en vías de convertirse en un agujero negro, o un agujero negro.

Dos meses después, los astrónomos anunciaron GW170817 al mundo. El 16 de octubre de 2017, el repositorio arXiv.org, un sitio web en el que los científicos comparten sus resultados antes de enviarlos a una revista, recibió 67 manuscritos: un número que en dos meses prácticamente se duplicó. «Me está costando mantenerme al tanto de todo», confiesa Alessandra Corsi, de la Universidad de Tecnología de Texas.

Unos cuantos problemas astronómicos que hasta entonces carecían de solución cayeron como moscas. Ahora sabemos que el tipo concreto de estallido de rayos gamma que observó Fermi —una variedad conocida desde hacía décadas, pero cuya fuente nunca se había identificado de forma directa— está causado por fusiones de estrellas de neutrones. También se confirmó que las kilonovas son el tipo de fenómeno donde se sintetizan gran parte de los elementos más pesados del universo, como platino, uranio y «una masa de oro unas cien veces mayor que la de la Tierra», apunta Samaya Nissanke, astrofísica de la Universidad Radboud, en los Países Bajos. En las semanas posteriores, los químicos enmendaron los listados donde recogen las fuentes de los elementos de la tabla periódica. Además, las características de las ondas gravitacionales detectadas han permitido descartar varias de las teorías alternativas a la relatividad general que, a lo largo de los años, se han propuesto para explicar la existencia de la materia oscura [*véase* «Las teorías de la gravedad tras la tormenta cósmica», por Miguel Zumalacárregui Pérez; Investigación y Ciencia, junio de 2018].

Como siempre, el hallazgo también suscitó nuevas preguntas. Los astrónomos desean saber qué sucede después de la fusión de dos estrellas de neutrones. También les gustaría presenciar la fusión entre una estrella de neutrones y un agujero negro. Todavía no saben con exactitud cómo colapsa el núcleo de una estrella cuando se desencadena una explosión de supernova. Y querrían observar la fusión de dos de los agujeros negros supermasivos que ocupan el centro de las galaxias.

Por tanto, además del gran número de telescopios electromagnéticos recién estrenados o planificados para los próximos años, los científicos prevén la llegada de nuevos detectores para los otros mensajeros. La red de LIGO se está ampliando con nuevos observatorios en Japón y la India. La Agencia Espacial Europea planea la construcción de la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA), un detector espacial de ondas gravitacionales que entrará en funcionamiento en la década de 2030. Sus «brazos» serán rayos láser que viajarán entre tres naves espaciales dispuestas en un triángulo de millones de kilómetros de lado. Y también hay en camino nuevos detectores de neutrinos de alta energía; entre ellos, un IceCube de próxima generación y el experimento KM3NeT, que constará de un kilómetro cúbico de sensores situados a 3500 metros de profundidad en el mar Mediterráneo.

LA APUESTA

No hay nada que motive más a los astrónomos que descubrir fenómenos celestes que no estaban seguros de poder ver. Nissanke obtuvo su doctorado en 2007 en el Instituto de Astrofísica de París, y cada día desde entonces ha estado pensando en cómo observar con luz las fuentes de ondas gravitacionales. Daba charlas sobre el tema y recibía preguntas críticas. «Me decían: "Tienes unas incertidumbres enormes, estás midiendo desplazamientos diminutos con enormes errores en las posiciones celestes".» Y cuando no hacían preguntas, tampoco parecían impresionados: «La mitad de la audiencia me miraba como si hubiera tomado drogas. La otra mitad estaba dormida». Así pasó diez años.

El 17 de agosto de 2017, en una charla que impartió en una conferencia celebrada en Ámsterdam, predijo que los primeros eventos de multimensajeros con luz y ondas gravitacionales llegarían en los años veinte de este siglo. «Las manos se alzaron: "Samaya, ¿no estás siendo demasiado optimista?".» Después de la charla se fue a comer con algunos integrantes del consorcio LIGO-India y, durante el almuerzo, subió la apuesta: «[Normalmente] no apuesto, pero dije que creía que veríamos la primera fusión de estrellas de neutrones». Los científicos de LIGO-India respondieron que eso no ocurriría antes de 2019 y aceptaron la apuesta. Una hora más tarde, LIGO-Virgo observó el evento GW170817. Un miembro del consorcio le escribió: antes de la próxima conferencia, «tentemos a la naturaleza» y hablemos sobre si presenciaremos la fusión entre un agujero negro y una estrella de neutrones.

Nissanke hace una pausa en su historia. «Pronostiqué esta fusión de estrellas de neutrones, este sistema binario de oro, pero tardamos varias horas en convencernos de que realmente estábamos viéndola», dice. «Va a haber más emoción y muchísimos más artículos. Es increíblemente divertido.» IyC

PARA SABER MÁS

Multi-messenger observations of a binary neutron star merger. B. P. Abbott et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 848, n.º 2, art. L12, 20 de octubre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

IceCube: Astrofísica desde el hielo. Carlos Pérez de los Heros en *IyC*, marzo de 2013.
La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Alicia M. Sintes y Borja Sorazu en *IyC*, febrero de 2017.
Las teorías de la gravedad tras la tormenta cósmica. Miguel Zumalacárregui Pérez en *IyC*, junio de 2018.

NANOTECNOLOGÍA

PARTÍCULAS BICÉFALAS

Las partículas de Jano, curiosas nanoestructuras con dos caras, están ofreciendo nuevas posibilidades en biomedicina, química analítica y ciencias ambientales

Susana Campuzano, Paloma Yáñez-Sedeño y José M. Pingarrón



EN SÍNTESIS

Las partículas de Jano constan de dos partes fabricadas con materiales distintos. Ello les otorga una multifuncionalidad que abre la puerta a todo tipo de aplicaciones.

Se han creado partículas de Jano con utilidad en procesos industriales, como el refinado de biocombustibles o la descontaminación de aguas. Otras destacan por sus usos en biomedicina.

Ciertas partículas de Jano tienen incluso capacidad para autopropulsarse, lo que ha permitido novedosas aplicaciones en áreas como la detección de biomoléculas o la administración de fármacos.



NANOESTRUCTURAS CON DOS CARAS: Las partículas de Jano, así llamadas en honor al dios romano de los comienzos y los finales, constan de dos materiales y pueden adoptar numerosas formas. Esa versatilidad las hace aptas para todo tipo de aplicaciones que serían imposibles de lograr con partículas normales.

Susana Campuzano es profesora titular del Departamento de Química Analítica de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y miembro del Grupo de Electroanálisis y (Bio)Sensores Electroquímicos.

Paloma Yáñez-Sedeño es catedrática del Departamento de Química Analítica de la Facultad de Ciencias Químicas de la UCM y miembro del Grupo de Electroanálisis y (Bio)Sensores Electroquímicos.

José Manuel Pingarrón es catedrático del Departamento de Química Analítica de la Facultad de Ciencias Químicas de la UCM, donde dirige el Grupo de Electroanálisis y (Bio)Sensores Electroquímicos.



«UNOS NUEVOS ANIMALILLOS» con un gran potencial práctico. Así presentaba las partículas de Jano el investigador Pierre-Gilles de Gennes durante su discurso de recepción del premio Nobel de física, concedido en 1991 por sus contribuciones al estudio de los cristales líquidos y los polímeros. Sintetizadas por primera vez en 1988 por Christiane Casagrande y su equipo en el Laboratorio de Física de la Materia Condensada del CNRS francés, estas partículas deben su nombre a *Ianus*, o Jano, el dios de los comienzos y los finales en la mitología romana, que, debido a su carácter dual, era representado con dos caras mirando hacia lados opuestos.

Esa dualidad es justamente la característica principal de las partículas de Jano. Por contraposición a las partículas normales, las cuales se componen de un único material, las partículas de Jano constan de dos o más sustancias distribuidas de forma asimétrica. Son por ello multifuncionales, ya que combinan propiedades diversas en distintas zonas de una misma unidad estructural. La distribución de dichos materiales puede variar desde unos pocos puntos de un material dispersos en el otro hasta dos semiesferas, entre otras posibilidades. Además, las partículas de Jano son a menudo de tamaño nanométrico, lo que permite aprovechar las ventajas inherentes a los nanomateriales, como su elevada relación entre área y volumen o su alta capacidad catalítica; es decir, la facultad para acelerar reacciones químicas. El hecho de que combinen diferentes propiedades químicas y físicas (ópticas, eléctricas o magnéticas) en una misma unidad las hace aptas para todo tipo de aplicaciones que serían imposibles de llevar a cabo con partículas tradicionales.

En los últimos años, el diseño de nanopartículas de Jano ha atraído el interés científico en diversas áreas. Sus novedosas propiedades, como la anfifilicidad (ser a la vez hidrófilas e hidrófobas) o la capacidad de autopropulsión han permitido su empleo en disciplinas tan diversas como la química analítica, la biomedicina o las ciencias ambientales. A la vista de estos avances, cabe esperar que, en un futuro cercano, se popularice el uso de estas partículas en el tratamiento de aguas, el diseño de nuevos biosensores o la liberación controlada de fármacos, entre otras aplicaciones.

NUEVAS POSIBILIDADES QUÍMICAS

Las nanopartículas de Jano presentan importantes usos como catalizadores de reacciones químicas en interfases líquido-líquido. Estas reacciones tienen interés en procesos industriales en los que se presentan sistemas en dos fases, una acuosa y otra orgánica. Por ejemplo, en la mejora de biocombustibles, la elevada cantidad de agua de la materia prima y el carácter orgánico del producto hacen que la existencia de dos fases resulte inevitable. En estos casos, la preparación de una emulsión (la dispersión de un líquido en otro inmiscible con él, como la que forman las gotas de aceite en el agua) se muestra muy adecuada, ya que aumenta la superficie de contacto entre ambos líquidos. Para estabilizar las emulsiones suelen emplearse agentes emulsificantes, como los detergentes; sin embargo, su uso presenta el problema de que dichos agentes deben retirarse para que no interfieran en la mezcla de reacción.

Se ha visto que las partículas de Jano con una cara hidrófila y otra hidrófoba actúan como estabilizantes de las emulsiones, ya que tienden a situarse de manera natural en la interfase entre ambos medios (el lado hidrófilo se sitúa en la fase acuosa, y el hidrófobo, en la fase orgánica). Esta propiedad permite prescindir de los emulsificantes. Pero, además, si las partículas de Jano contienen un catalizador, pueden usarse para favorecer las reacciones de interés.

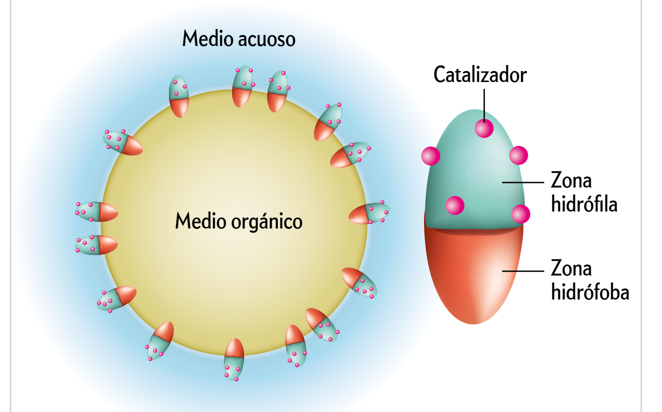
Esa actividad catalítica puede hacerse selectiva en cada una de las fases, como demostraron en 2010 Daniel E. Resasco y su equipo de la Universidad de Oklahoma. Estos investigadores usaron nanopartículas de Jano compuestas de nanotubos de carbono, sílice y paladio como catalizadoras de la hidrogenación de benzaldehído disuelto en un líquido orgánico y glutaraldehído disuelto en una fase acuosa. Las partículas contaban con un lado hidrófilo y otro hidrófobo. Cuando contenían paladio en ambos lados, se obtuvieron altos niveles de conversión en los dos compuestos; es decir, la adición de hidrógeno tuvo lugar tanto en el benzaldehído como en el glutaraldehído. En cambio, cuando el paladio se encontraba solo en la parte hidrófoba, la reacción del glutaraldehído casi no se produjo, ya que el paladio no podía actuar en la fase acuosa. Esta alta selectividad

PÁGINAS ANTERIORES: *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*, SEGÚN LOS AUTORES

COMPORTAMIENTO QUÍMICO

Abanico de posibilidades

Al estar fabricadas con varios materiales distribuidos de forma asimétrica, las partículas de Jano presentan propiedades diferentes en distintas zonas de una misma unidad estructural. Ello implica todo tipo de comportamientos químicos imposibles de obtener con partículas normales. A continuación se ilustran dos de ellos: la catalización selectiva de reacciones químicas en emulsiones (*arriba*) y la capacidad para formar agregados en respuesta a cambios de temperatura o de *p*H (*abajo*).

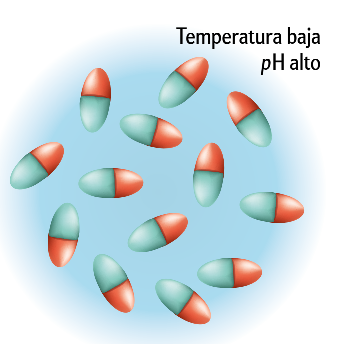


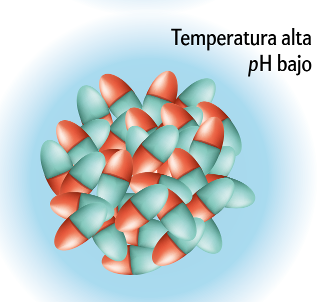
Control de reacciones químicas

Numerosos procesos industriales, como el refinado de biocombustibles, implican la presencia simultánea de dos líquidos inmiscibles, uno acuoso (*azul*) y otro orgánico (*amarillo*). Tales combinaciones, análogas a la que forman las gotas de aceite en el agua, se denominan emulsiones. Las partículas de Jano con un lado hidrófilo (*verde*) y otro hidrófobo (*rojo*) tienden a situarse de manera natural en la interfase entre ambos líquidos. Además de estabilizar la emulsión, añadir un catalizador (*magenta*) en una o en ambas zonas de la partícula puede inducir reacciones químicas de interés en la fase deseada.

Comportamiento ajustable

Se han creado partículas de Jano que responden de manera controlada y reversible a cambios en el *p*H o la temperatura, de modo que pueden dispersarse (*arriba*) o formar agregados (*abajo*) a voluntad. Este comportamiento frente a estímulos externos ha demostrado su utilidad en distintos procesos, como la estabilización de emulsiones. Al mismo tiempo, el *p*H y la temperatura influyen en una de las propiedades más útiles de las partículas de Jano: su capacidad para autopropulsarse.





INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LOS AUTORES

presenta un alto interés industrial. Por ejemplo, en el refinado de biocombustibles, el empleo de catalizadores con selectividad de fase logra que solo se hidrogenen las especies solubles en el medio orgánico, sin perder rendimiento a causa de la reacción de deshidratación que tiene lugar en la fase acuosa.

Otra de las propiedades que se han investigado es la respuesta de las partículas de Jano a estímulos externos. En concreto, las partículas sensibles a las variaciones de *p*H o temperatura pueden tanto estabilizar emulsiones como dispersarse o formar agregados de manera controlada y reversible. En 2007, Marco Lattuada y T. Alan Hatton, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, prepararon nanopartículas magnéticas con sílice como soporte principal y las trataron con dos tipos de polímeros. Con uno de ellos consiguieron partículas que se mantenían dispersas a *p*H elevado pero que se agregaban cuando el *p*H disminuía; con el otro lograron partículas que respondían de forma análoga pero a las variaciones de temperatura. Por otro lado, el *p*H y la temperatura también condicionan de manera crítica una de las propiedades más útiles de las partículas de Jano: su capacidad de autopropulsión.

MOTORES DE JANO

En determinadas condiciones experimentales, las partículas de Jano pueden propulsarse de manera autónoma, en cuyo caso reciben el nombre de motores de Jano. Esto puede lograrse gracias a ciertas reacciones electroquímicas o a la incorporación de metales capaces de generar burbujas gaseosas, lo que impulsa el motor. Se han descrito motores de Jano basados en polímeros, metales, óxidos, carbono o sílice. Al mismo tiempo, la aplicación de una capa magnética posibilita su guiado o captura a voluntad. Hasta el momento, los motores de Jano han demostrado su utilidad como detectores de biomoléculas, en técnicas de descontaminación de aguas o en la administración de agentes antibacterianos para tratar infecciones.

En 2010, el grupo de Joseph Wang, de la Universidad de California en San Diego, fue pionero en el uso de nanomotores de Jano para la detección de ácidos nucleicos. Los motores empleados por su grupo eran nanohilos formados por una pequeña barra de oro unida en uno de sus extremos a otra de platino. En una disolución con un pequeño porcentaje de agua oxigenada (H_2O_2), estos nanohilos se autopropulsan a velocidades del orden de 10 micrómetros por segundo. Ello es debido a que el extremo de platino cataliza la oxidación del H_2O_2, lo que genera electrones y protones libres en esa zona del nanomotor. Debido a la estructura del nanohilo, se genera un reparto asimétrico de cargas y un gradiente eléctrico, lo que se traduce en el avance autónomo del nanomotor en la dirección en la que apunta el extremo de platino.

La actividad catalítica del platino mejora de manera considerable en presencia de iones de plata (Ag^+), lo que permite alcanzar velocidades hasta seis veces mayores. Esta aceleración selectiva fue usada por el grupo de Wang para detectar ADN y ARN de la bacteria *Escherichia coli*. Para ello, emplearon una sonda de detección modificada con nanopartículas de Ag. Una vez que el ácido nucleico diana hibridó con la sonda que contenía iones de Ag, obtuvieron una disolución que incluía iones Ag^+ en una cantidad proporcional a la concentración de ácido nucleico que deseaban detectar. Por último, al introducir nanomotores de oro y platino y medir la distancia recorrida por estos durante un tiempo fijo, los investigadores observaron que el desplazamiento de los nanomotores era proporcional a la concentración de ADN o ARN.

Esos avances supusieron un cambio paradigmático en el área del bioanálisis, ya que por primera vez se proponía usar la distancia recorrida por un nanomotor como señal analítica. Comparado con las técnicas tradicionales, este principio facilita la recopilación de múltiples lecturas en un único experimento y reduce la probabilidad de obtener falsos positivos o negativos. Además, el método puede extenderse con facilidad a otros ensayos de detección.

En fecha más reciente, varias configuraciones de micromotores basados en partículas de Jano esféricas han demostrado su utilidad en la descontaminación de aguas y otros líquidos. En todos los casos, la propulsión permite que estos motores se mezclen en el líquido mucho mejor que las partículas estáticas, lo que mejora de manera significativa los resultados. Entre las distintas aplicaciones destacan los micromotores de oro y magnesio, los cuales operan gracias a reacciones de corrosión que generan burbujas en uno de sus lados, lo que propulsa al motor en sentido opuesto. Estas partículas de Jano han demostrado su capacidad para hidrolizar selectivamente plaguicidas tóxicos, como el paraoxón, o contaminantes emergentes, como el difenilftalato.

Varios trabajos, entre ellos los del equipo de Alberto Escarpa, de la Universidad de Alcalá de Henares, han demostrado que estos micromotores de Jano permiten llevar a cabo simultáneamente la determinación y la degradación de compuestos tóxicos en líquidos complejos, como leche y suero humano, sin aplicar ningún pretratamiento y en tan solo cinco minutos. Además, este mismo grupo ha mostrado la posibilidad de usar micromotores de Jano para la monitorización sensible y ultrarrápida de especies de elevada toxicidad, como las endotoxinas bacterianas liberadas por *E. coli*.

La capacidad de algunos motores de Jano para retener átomos o moléculas en su superficie (adsorción) o la de formar complejos con iones de metales pesados (quelación) se ha aprovechado en la eliminación de metales pesados o en la fotodegradación de colorantes. En esta línea, el equipo de Wang ha diseñado motores basados en microesferas de carbono activado que se comportan como plataformas móviles muy eficientes para la purificación de aguas, habiendo demostrado su utilidad para la eliminación rápida de metales pesados, explosivos, agentes nerviosos y colorantes. El mismo grupo ha preparado micromotores muy eficientes para la degradación de agentes de guerra química y biológica.

Por último, otra novedosa aplicación de los motores de Jano consiste en el transporte eficiente y la liberación controlada de fármacos en una localización específica. El año pasado, el equipo de Wang propuso por primera vez un método para emplear motores de Jano en una aplicación terapéutica *in vivo*: la liberación del antibiótico claritromicina en el estómago de ratones para tratar una infección producida por *Helicobacter pylori*. A tal fin, los investigadores utilizaron micromotores de magnesio con el medicamento encapsulado, los cuales se propulsaban por generación de burbujas de hidrógeno tras la disolución del magnesio en el medio gástrico. En comparación con el uso de portadores pasivos, el empleo de estos motores mejora la eficiencia de la liberación del antibiótico y, con ella, la eliminación de las bacterias.

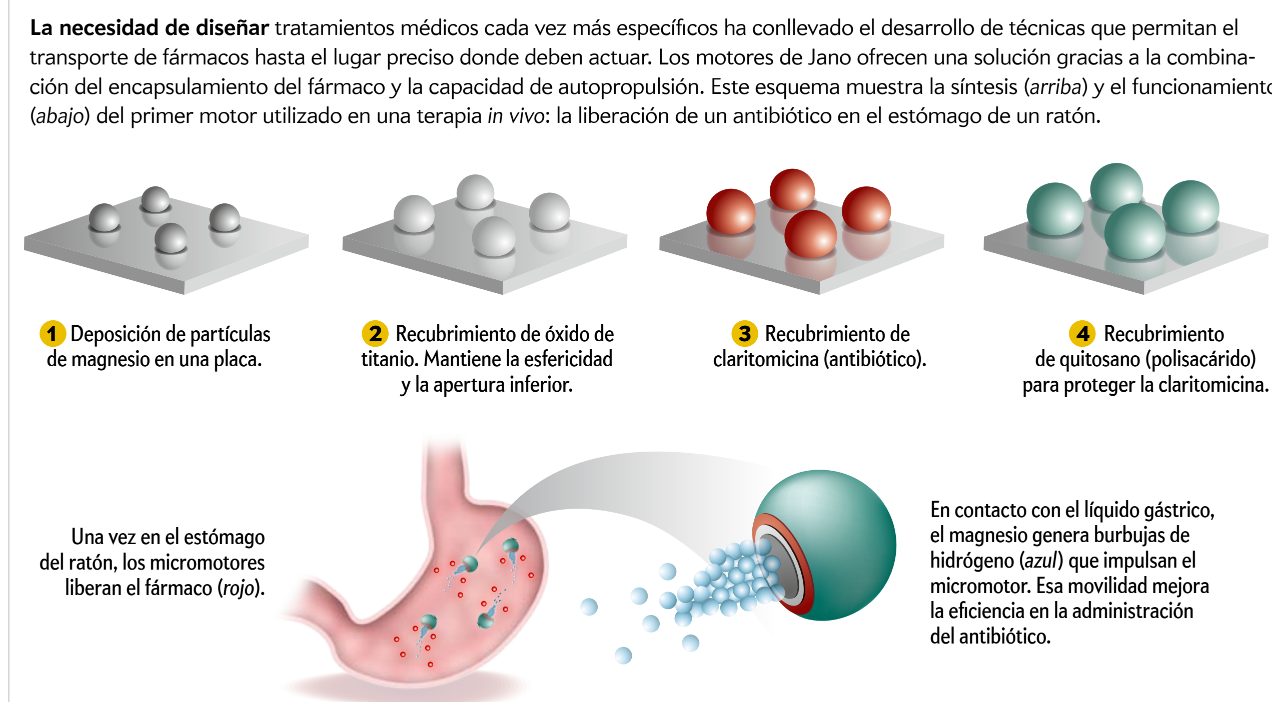
BIOMEDICINA INNOVADORA

En los últimos años ha aumentado de manera considerable el número de biosensores basados en partículas de Jano. Aparte de los ejemplos ya mencionados, basados en el uso de motores, una

MOTORES MICROSCÓPICOS

Un vehículo para tratar infecciones

La necesidad de diseñar tratamientos médicos cada vez más específicos ha conllevado el desarrollo de técnicas que permitan el transporte de fármacos hasta el lugar preciso donde deben actuar. Los motores de Jano ofrecen una solución gracias a la combinación del encapsulamiento del fármaco y la capacidad de autopropulsión. Este esquema muestra la síntesis (*arriba*) y el funcionamiento (*abajo*) del primer motor utilizado en una terapia *in vivo*: la liberación de un antibiótico en el estómago de un ratón.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, ADAPTADO DE: «MICROMOTOR-ENABLED ACTIVE DRUG DELIVERY FOR IN VIVO TREATMENT OF STOMACH INFECTION», POR BERTA ESTEBAN-FERNÁNDEZ DE ÁVILA ET AL. EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 8, ART. N.º 272, AGOSTO DE 2017.

de las áreas de investigación más activas la ocupa la detección de biomarcadores tumorales.

Al respecto cabe destacar el trabajo de Dong Woo Lim, de la Universidad Hanyang de Corea del Sur, para la detección simultánea de dos biomoléculas: el antígeno carcinoembriónico (CEA, un marcador tumoral muy heterogéneo cuya concentración aumenta en los carcinomas colorrectales, de estómago, pulmón y mama, entre otros) y el de la inmunoglobulina G humana (IgG, un anticuerpo común). Para ello, los investigadores emplearon micropartículas poliméricas con dos caras: un lado contenía un colorante fluorescente y anticuerpos del CEA, mientras que el otro albergaba un colorante distinto y el anticuerpo IgG. De esta manera, al anclar los antígenos objeto de análisis a un sustrato de cristal y verter sobre él las partículas de Jano, cada una de ellas solo se adhería al CEA o al antígeno de la IgG por el lado correspondiente, dejando a la vista el colorante situado en el lado opuesto. Por último, cuantificar la fluorescencia de cada colorante permitió determinar la concentración de cada antígeno. Este método pone de relieve las ventajas asociadas a la multifuncionalidad de las partículas de Jano, ya que permite detectar simultáneamente dos biomarcadores con un solo tipo de micropartícula.

En relación con los biosensores electroquímicos basados en partículas de Jano, un equipo liderado por Reynaldo Villalonga, de la Universidad Complutense de Madrid, y uno de nosotros (Pingarrón) ha desarrollado la primera plataforma de nanopartículas de oro y sílice como sistema de biorreconocimiento electroquímico integrado. Como prueba de concepto de esta estrategia, la configuración se aplicó al reconocimiento de biotina, o vitamina H, una sustancia de gran interés clínico y biomédico por contribuir al crecimiento saludable de la piel y el cabello, entre otras propiedades.

Las interesantes aplicaciones que han demostrado en los últimos años las partículas de Jano están abriendo nuevas vías de investigación en biomedicina, química analítica y ciencias ambientales en términos de bajo coste, simplificación, versatilidad y eficiencia. Teniendo en cuenta los avances logrados en este campo, resulta esperable que en un futuro no muy lejano las partículas de Jano se apliquen en el tratamiento de aguas, la quimioterapia, los sensores portátiles o en nuevos dispositivos para el diagnóstico rápido de enfermedades, el análisis ambiental o el control de calidad de los alimentos.

PARA SABER MÁS

Motion-based DNA detection using catalytic nanomotors. Jie Wu et al. en *Nature Communications*, vol. 1, art. n.° 36, julio de 2010.
Synthesis, properties and applications of Janus nanoparticles. Marco Lattuada y T. Alan Hatton en *Nano Today*, vol. 6, págs. 286-308, junio de 2011.
Janus Au-mesoporous silica nanoparticles as electrochemical biorecognition-signaling system. Alfredo Sánchez et al. en *Electrochemistry Communications*, vol. 30, págs. 51-54, mayo de 2013.
Micromotor-enabled active drug delivery for in vivo treatment of stomach infection. Berta Esteban-Fernández de Ávila et al. en *Nature Communications*, vol. 8, art. n.° 272, agosto de 2017.
Janus particles for (bio)sensing. Paloma Yánez-Sedeño, Susana Campuzano y José Manuel Pingarrón en *Applied Materials Today*, vol. 9, págs. 276-288, diciembre de 2017.

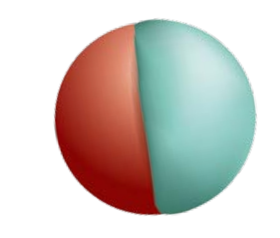
EN NUESTRO ARCHIVO

Fármacos dirigidos contra el cáncer. Dina Fine Maron en *IyC*, junio de 2015.
Nanobots terapéuticos. Larry Greenemeier en *IyC*, junio de 2015.
Nanodispositivos para detectar infecciones. Shana O. Kelly en *IyC*, enero de 2016.

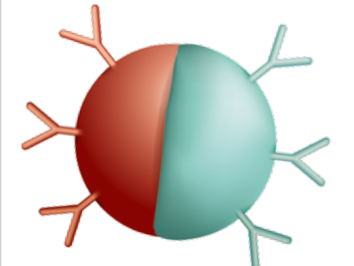
BIOSENSORES

Detección de marcadores tumorales

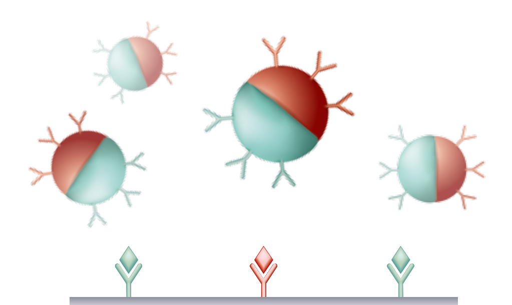
Gracias a sus dos caras, las partículas de Jano permiten la detección simultánea de dos biomoléculas diferentes en un solo ensayo. Esta estrategia se ha aplicado con éxito a la identificación del antígeno carcinoembriónico, un biomarcador tumoral, y el antígeno de la inmunoglobulina G humana.



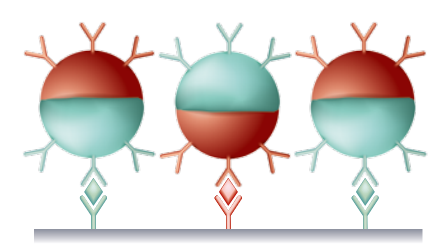
1 Las partículas de Jano son tratadas con dos colorantes fluorescentes distintos, uno en cada cara.



2 En cada lado se incluyen anticuerpos específicos (*con forma de Y*) para cada uno de los antígenos que se desea detectar.



3 La solución con las partículas se vierte sobre un sustrato al que se han anclado los antígenos objeto de análisis (*rombos*).



4 Cada anticuerpo solo se une a los antígenos correspondientes, lo que deja a la vista el colorante del lado opuesto. Por último, cuantificar la fluorescencia de cada colorante permite determinar la concentración de cada antígeno.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, ADAPTADO DE: «JANUS PARTICLES FOR (BIO)SENSING», POR PALOMA YÁNEZ-SEDEÑO, SUSANA CAMPUZANO Y JOSÉ MANUEL PINGARRÓN EN *APPLIED MATERIALS TODAY*, VOL. 9, PÁGS. 276-288, DICIEMBRE DE 2017.

Mark Vellend es ecólogo en la Universidad de Sherbrooke, en Quebec. Investiga las respuestas ecológicas y evolutivas que las comunidades vegetales despliegan frente a los cambios ambientales. Su último libro vio la luz en 2016: *The theory of ecological communities*, Princeton University Press.



BIOLOGÍA

LA PARADOJA DE LA CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD

La noción de que «la biodiversidad es siempre positiva» ha sido adoptada acríticamente por numerosos científicos y por la sociedad. La realidad ecológica es más sutil

Mark Vellend

Desde que *Homo sapiens* hollara por primera vez Nueva Zelanda en algún momento del siglo xiii, la flora del país se ha duplicado y ha pasado de unas 2000 a más de 4000 especies. Estas islas, carentes de mamíferos terrestres autóctonos, aparte de un puñado de murciélagos, albergan ahora más de dos docenas: zarigüeyas, conejos, ciervos o ualabíes, por citar algunos. La biodiversidad ha aumentado. Y sin embargo, a Nueva Zelanda —como al resto del planeta— se la considera víctima de una «crisis de biodiversidad» que está causando la extinción de seres vivos a un ritmo alarmante. Estos hechos y afirmaciones aparentemente contradictorios han avivado un intenso debate científico en los últimos años.

Numerosos atributos de la naturaleza que la gente valora por encima de todo se han visto seriamente afectados por nuestras actividades, pero al mismo tiempo la biodiversidad no ha variado e, incluso, en muchos casos ha aumentado. Podemos entender esta contradicción, denominada «paradoja de la conservación de la biodiversidad», si pensamos que los patrones y los procesos ecológicos pueden diferir según la escala espacial considerada —pequeña o grande—, extremo que constituye un viejo tema de debate en ecología. Así, por ejemplo, la desaparición de casi la mitad de la avifauna autóctona de Nueva Zelanda supone una pérdida global para la diversidad aviar, puesto que todas las especies eran endémicas y no habitaban en ningún otro lugar del planeta. La introducción humana de casi el mismo número de aves que las que se han extinguido ha mantenido la diversidad de esta clase zoológica en el archipiélago, pero ha significado una pérdida en el cómputo global, puesto que las recién llegadas ya vivían en otros lugares.

No obstante, el hecho de que las variaciones de la biodiversidad difieran en función de la escala espacial no resuelve por entero la paradoja. El grueso de los ecólogos y los biólogos de la conservación (entre los que me incluyo) seguiría calificando la situación de Nueva Zelanda como «mala» aun en el supuesto de que las pérdidas regionales no fueran también globales. A la naturaleza virgen, no alterada por la mano humana, le atribuimos un gran valor, totalmente al margen de las consideraciones científicas. En otras palabras, los valores humanos influyen en



LOS ALTRAMUCES ARBORESCENTES (*Lupinus arboreus*) crecen a orillas del lago Wakatipu, en la Isla del Sur de Nueva Zelanda, como especie introducida desde Estados Unidos. Algunos investigadores afirman que las especies exóticas merman la biodiversidad, pero en Nueva Zelanda el número de especies vegetales se ha doblado y las extinciones de plantas autóctonas son mínimas.

JACK DYKINGA/NATURE PICTURE LIBRARY

el modo en que describimos y estudiamos la biodiversidad. Por ello, para resolver de una vez por todas la paradoja de la conservación de la biodiversidad, primero necesitamos examinar de qué modo la ciencia y los valores humanos se entrelazan en el desarrollo de los propios conceptos de biodiversidad y de especie exótica. La colisión de las narrativas dominantes en estos dos temas acaba revelando incoherencias lógicas; es la paradoja con la que los ecólogos y los biólogos de la conservación han estado lidiando.

¿ES SIEMPRE BUENA LA BIODIVERSIDAD?

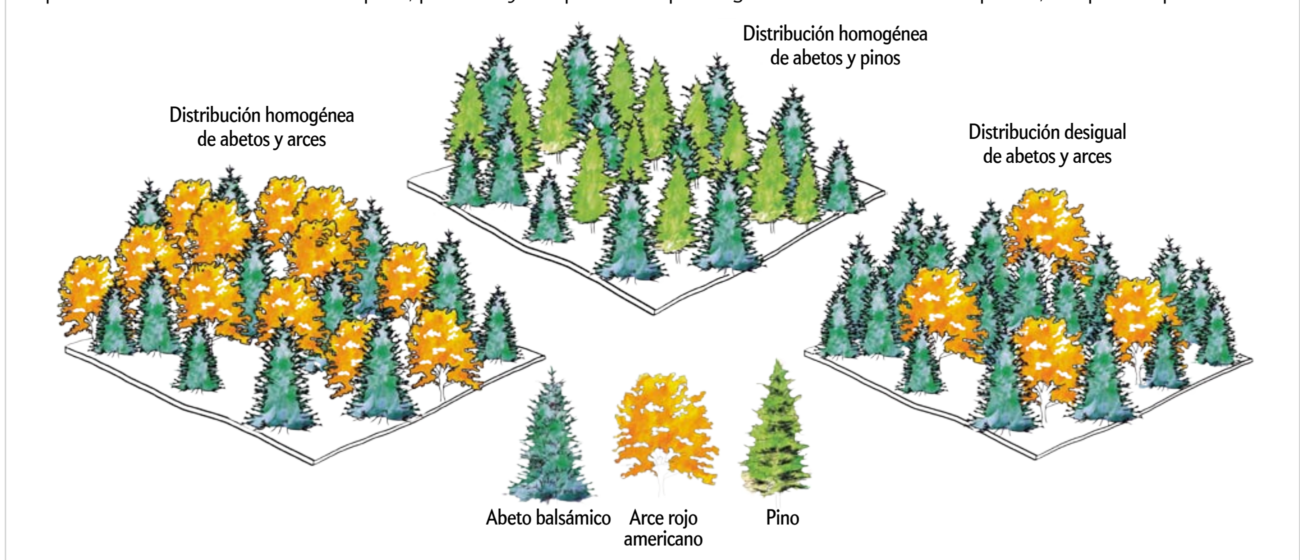
La noción de que «la biodiversidad es buena» se difundió como uno de los postulados del naciente campo de la biología de la conservación durante los años ochenta, y en la década posterior los estudiantes de ecología la aceptamos ciegamente. Pero el impulso por conservar la naturaleza en estado puro se remonta a mucho más atrás. Nuestro sentimiento de profundo vínculo con la naturaleza y su asombrosa variedad de formas vivientes nos empujó a aceptar y promulgar los argumentos acerca del valor que la biodiversidad tiene para el bienestar humano. Los apasionados alegatos a favor de la conservación de la vida silvestre de los colegas Norman Myers, Paul Ehrlich y Edward O. Wilson quedaron grabados a fuego en los manuales de biología de la conservación, sin dejar resquicio a la pregunta de si la biodiversidad es siempre buena y si la actividad humana es siempre perjudicial para su mantenimiento. La destrucción y la fragmentación de los hábitats, el cambio climático, la contaminación de los nutrientes y las especies invasoras son malas y nefastas, sin discusión. Si alguien ha hablado alguna vez sobre excepciones o matices, no ha elevado el tono de voz lo suficiente como para llegar a las aulas y a la siguiente generación de ecólogos y biólogos de la conservación.

En esta disciplina, el concepto de biodiversidad vino para asentarse en el centro mismo de las políticas de conservación adoptadas en todo el mundo. Hasta el año pasado, 196 países o entidades políticas habían ratificado el Convenio sobre la Diversidad Biológica, que entró en vigor en 1993. (Estados Unidos es un caso singular, pues ha firmado el convenio pero no lo ha ratificado.) El primer objetivo del convenio es sencillamente «la conservación de la diversidad biológica», meta que cada país

DISTINTOS ÍNDICES

Medir la biodiversidad

La biodiversidad puede expresarse a partir de diferentes índices que reflejan el número total de especies, el grado de homogeneidad en la distribución de esas especies o el grado de parentesco entre ellas. Todos los bosques visibles en el diagrama inferior albergan el mismo número de especies (dos), pero el de la izquierda parece claramente más diverso que los otros. Eso es porque el bosque del centro acoge dos especies afines de coníferas de aspecto muy parecido, que tienen más genes en común y podrían compartir muchos roles funcionales; por tales razones posee menos diversidad funcional y filogenética. El de la derecha alberga la misma diversidad filogenética y el mismo número de especies que el de la izquierda, pero en este último los ejemplares de ambas especies están repartidos más uniformemente. Así pues, posee mayor equidad aunque tenga el mismo número de especies, o riqueza específica.



ha perseguido de diversas maneras, quizá la más común de ellas otorgando protección legal a las especies en peligro.

Puesto que la palabra *biodiversidad* no se generalizó hasta finales de los ochenta, los ecólogos también han andado enfrascados en la tarea más mundana de elaborar y calcular viejos y nuevos índices para cuantificarla. El más sencillo es la riqueza de especies: su número en un lugar y momento dados. Los índices de equidad (uniformidad) pretenden reflejar la idea de que, por ejemplo, una comunidad con dos especies igualmente abundantes es más diversa que otra en la que una sea dominante y la segunda muy escasa. Una tercera clase de índices persigue capturar la diversidad de los caracteres funcionales o filogenéticos, en virtud de la cual un bosque donde crezcan pinos y arces se considera más diverso que otro donde solo lo hagan dos especies de pino, o de arce. La riqueza de especies es el único baremo que ha sido descrito con la frecuencia suficiente y de una forma lo bastante armonizada como para posibilitar comparaciones generales entre regiones, hábitats, taxones o escalas de espacio y tiempo distintos.

Los índices cuantitativos de la biodiversidad poseen el útil atributo científico de no incorporar juicios de valor a priori acerca de las diversas especies según su origen geográfico. Si una especie autóctona desaparece y otra exótica se establece (o viceversa), la riqueza específica permanece inalterada. Estos cálculos exentos de valores contrastan marcadamente con la incorporación inequívoca de valores en el estudio y en las políticas de gestión de la biodiversidad, sobre todo en lo relativo a las especies exóticas. En su texto pionero, *The ecology of invasions by animals and plants*, Charles Elton marcó en 1958 la pauta para la biología de las invasiones que aún perdura hoy: «No son solo las bombas atómicas y la guerra las que nos amenazan... este libro trata sobre las explosiones ecológicas». Dicho de otro modo, las especies exóticas, introducidas desde un continente a otro, son «malas»; hay que impedir que se establezcan y, si lo hacen, hay que erradicarlas.

Una de las razones aducidas para considerar las especies introducidas como perjudiciales es que son una causa importante de pérdida de la biodiversidad. Las aves ápteras de Nueva Zelanda no solo eran presas propicias para los humanos, sino que las más menudas, como el kiwi, eran (y son) muy vulnerables a la depredación por ciertas especies introducidas, como la zarigüeya y la comadreja. La Ley de Conservación neozelandesa

EN SÍNTESIS

Nuestro sentimiento de vínculo con la naturaleza ha influido en el modo en que se estudia la biodiversidad y ha llevado a la idea de que su pérdida resulta siempre perjudicial.

No obstante, se sabe que la biodiversidad no está disminuyendo de forma generalizada: los descensos que se producen a escala global no suelen observarse a escala regional y solo ocurren en situaciones concretas a escala local. Además, esos cambios no se traducen siempre en una pérdida de las funciones y los servicios que nos ofrecen los ecosistemas.

Los científicos deberían apartar los juicios de valor de la cuantificación de la biodiversidad o, por lo menos, indicar claramente cuándo sus conclusiones incorporan tales juicios.

SIGMA XI, *AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE*

distingue entre las especies indígenas y las introducidas, y uno de sus objetivos es «controlar cualquier especie introducida que cause daños a una especie o hábitat autóctonos». De hecho, los humanos pueden ser considerados una especie exótica en Nueva Zelanda, responsables directa o indirectamente de la mayoría de las extinciones acaecidas en los últimos siglos, si no de todas. Pero como ya hemos visto, las especies exóticas contribuyen a la biodiversidad local y regional del archipiélago. Si el caso de Nueva Zelanda fuera inusual, podríamos considerarlo una excepción a la norma de que las especies foráneas merman la biodiversidad. Pero resulta que, en realidad, la historia de estas islas es bastante habitual.

A inicios del presente siglo, Dov Sax, ahora en la Universidad Brown, y sus colaboradores dieron a conocer datos que ponen en entredicho la visión predominante que impera sobre las especies exóticas y la biodiversidad. En los siglos precedentes, en que el impacto humano ha sido más profundo, islas remotas cuya extensión varía entre menos de 1 kilómetro cuadrado y más de 250.000 han experimentado cambios en su riqueza de especies que reflejan exactamente los hechos constatados en Nueva Zelanda. En el caso de las aves, por cada una de las muchas especies desaparecidas se ha establecido una nueva especie introducida. En cuanto a la flora, son muy pocas las plantas autóctonas que han desaparecido en tales islas y, en líneas generales, el número de especies introducidas y establecidas iguala al de las originales, doblando así el total. La riqueza de peces de agua dulce muestra un auge aún más acusado, pues con el tiempo se ha multiplicado por cuatro en las islas remotas. Los ecólogos están estudiando y debatiendo vivamente si dichos resultados implican una capacidad de carga estable en ciertos grupos (como las aves), un aperturismo general a la colonización en comunidades de otros grupos (como las plantas), o si los niveles actuales de diversidad son pasajeros, con futuras extinciones y colonizaciones que alterarán o revertirán los cambios netos presenciados hasta la fecha.

En algunos estados o cuencas hidrográficas de Estados Unidos (contemplados como áreas continentales, no como islas), los cambios en la riqueza de especies marchan en la misma dirección, si bien con una magnitud menor: no hay cambio neto en la avifauna, pero sí un aumento del 20 por ciento en la flora y los peces, en promedio. En 2009, Marten Winter, ahora en el Centro Alemán de Investigación Integradora de la Biodiversidad, y sus colaboradores describieron un incremento equiparable, del 20 al 25 por ciento, en la flora de los países europeos durante los últimos 500 años. Puesto que las extinciones regionales en esas áreas continentales raramente representan extinciones globales, no podemos reconciliar esta manifestación de la paradoja de la conservación de la biodiversidad invocando la dependencia de la escala de su cambio. El traslado e introducción de especies en nuevos puntos del globo conlleva a menudo un aumento de la diversidad regional, aun cuando la diversidad global se reduzca.

El saldo neto de las actividades humanas en los siglos precedentes parece haber sido en promedio un incremento o, como mínimo, ningún cambio en la riqueza de especies a escala regional. Si la biodiversidad es buena, esta noticia debería serlo también, pero difícilmente hallaremos un ecólogo que lo afirme. Así que, a la escala regional o local, quizá no sea realmente la biodiversidad en sí misma lo que valoramos.

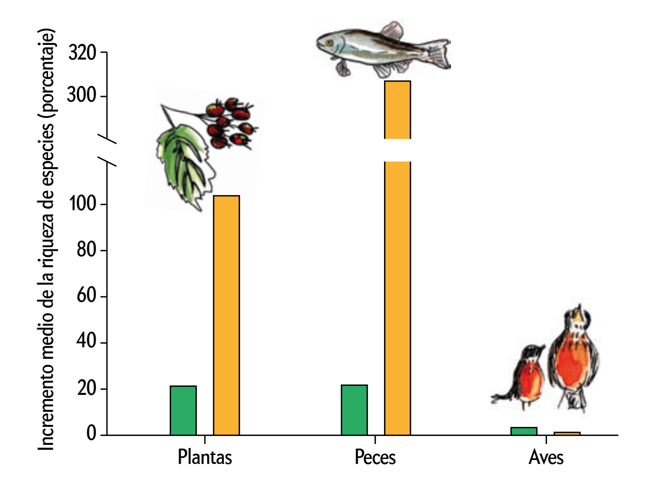
EL VALOR INSTRUMENTAL DE LA BIODIVERSIDAD

Durante décadas, los historiadores ambientales y los biólogos de la conservación han estado debatiendo los motivos por los que apreciamos la naturaleza y la biodiversidad. Algunos valores son íntimamente personales, como el sentimiento de obligación moral de salvaguardar la vida o los lazos espirituales con la naturaleza. En su mayor parte, tales valores quedan fuera de la esfera de la ciencia, excepto en el sentido de que podríamos averiguar cuánta gente los comparte. Nada hay en el bosque con lo que podamos cuantificar su valor espiritual o moral.

Pero existen otros atributos mensurables que sí tienen un valor menos ambiguo para la humanidad, como la depuración del aire que respiramos o del agua que bebemos. A tales atributos se los denomina valores instrumentales. Uno de los ejes centrales de la investigación ecológica de los últimos 25 años ha girado en torno a la creación experimental de ecosistemas con diferente número de especies que después han sido objeto de ensayos para analizar la influencia de ese número en las funciones ecosistémicas, entre ellas la producción de biomasa vegetal o la eficiencia en el uso de los nutrientes. Dichas funciones influyen a su vez en la eficiencia de los servicios ecosistémicos, como la eliminación del carbono de la atmósfera y la reducción de la escorrentía superficial y del lixiviado de nutrientes del suelo (que acabarían en las masas de agua). En los años ochenta, a Paul y Anne Ehrlich les gustaba comparar las extinciones biológicas con la pérdida de remaches en un aeroplano: unos pocos no afectan en nada, pero demasiados acaban haciendo estrellar el aparato. Estos estudios ponen a prueba esa hipótesis.

Con suma frecuencia, la producción de biomasa y la eficiencia en el uso de los nutrientes aumentan cuando lo hace el número de especies que integran un ecosistema. La biodiversidad potencia la función ecosistémica, no en todos los experimentos, pero sí en la mayoría. Aparentemente, este efecto daría a los partidarios de la conservación de la biodiversidad un argumento de peso: es preciso conservarla porque el bienestar humano depende de ella. Versiones de este argumento se han abierto camino hasta los documentos de innumerables entidades conservacionistas y ministerios de medioambiente de todo el mundo.

Pero aguardemos un minuto. Ahora ya sabemos que en los siglos pasados las introducciones de especies exóticas más bien han propiciado el aumento de la biodiversidad regional, no un



LA RIQUEZA EN FLORA Y FAUNA ha aumentado en las islas oceánicas (*barras amarillas*) desde la llegada del hombre en los últimos milenios, así como en las regiones continentales (*barras verdes*) desde la colonización europea. En el caso de las aves, el número de especies no ha cambiado mucho. En conjunto, no ha habido ninguna pérdida neta de biodiversidad a escala regional.

ADAPTADO DE «SPECIES DIVERSITY: FROM GLOBAL DECREASES TO LOCAL INCREASES». D. F. SAX Y S. D. GAINES EN *TRENDS IN ECOLOGY & EVOLUTION*, VOL. 18, PÁGS. 561-566, 2003

descenso. Y si más especies significan ecosistemas que funcionan mejor, entonces el balance neto de esas muchas introducciones y esas pocas extinciones de especies autóctonas debería ser una mejora de la función ecosistémica. Aquí el argumento de que la «biodiversidad es buena» entra en confrontación con el de que «las especies exóticas son malas», lo cual delata una incongruencia.

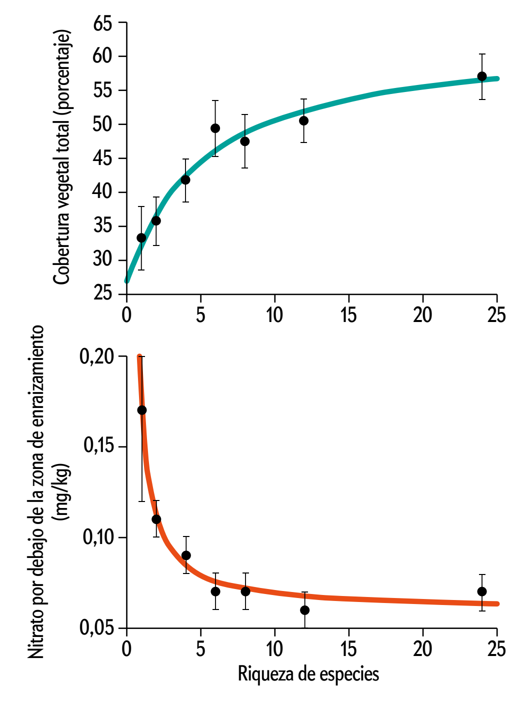
LA BIODIVERSIDAD A ESCALA LOCAL

El examen del vínculo entre la biodiversidad y la función ecosistémica nos lleva a volver sobre el asunto de cómo depende la biodiversidad de la escala espacial. Los experimentos más exhaustivos y mejor conocidos sobre este tema han tenido como protagonistas a plantas pratenses, con parcelas experimentales de 100 metros cuadrados, a lo sumo. Esta escala suele considerarse local, varios órdenes de magnitud por debajo de la más diminuta de las islas contempladas en los estudios regionales reseñados. Por un lado, los biólogos de la conservación tachan de irrelevantes los resultados obtenidos en esas escalas mínimas a efectos de política o gestión, pues estos suelen competer a parques nacionales, regiones o incluso países enteros. En este caso, sin embargo, el vínculo causal entre la biodiversidad y la función ecosistémica implica interacciones a pequeña escala entre las plantas, por lo que las parcelas de estudio constituyen una escala absolutamente pertinente.

Por norma general, los individuos de una especie vegetal crecen más si sus vecinos inmediatos pertenecen a otras especies. El ejemplo arquetípico lo encarnan las gramíneas y las leguminosas fijadoras de nitrógeno, como los tréboles. Estas fijan el nitrógeno atmosférico gracias a la simbiosis con bacterias, por lo que prosperan en los suelos pobres en ese elemento, que además incorporan al ecosistema. Las gramíneas asimilan eficazmente el nitrógeno y crecen con vigor, pero pueden acabar agotándolo. Así, ambos tipos producen juntos más biomasa que por separado. En las praderas densas, las plantas crecen hacinadas, separadas por escasos centímetros. La gramínea se beneficia del trébol que brota junto a ella, pero no del que crezca a 100 metros. Las interacciones entre las ocupantes de las parcelas de pocos metros cuadrados ejercen un gran impacto en ambas especies.

Por consiguiente, los cambios de la biodiversidad a pequeña escala sí revisten relevancia en los problemas de conservación. La diversidad vegetal puede estar aumentando a escala regional, pero si las praderas o los bosques están sufriendo pérdidas netas en su biodiversidad local, entonces el funcionamiento de esos ecosistemas podría estar degradándose. Si los ecólogos pretenden trasladar al mundo real los resultados de sus experimentos sobre el efecto de la biodiversidad en ciertas funciones ecosistémicas, primero deberían contrastar la suposición generalizada de que la biodiversidad local va a la baja.

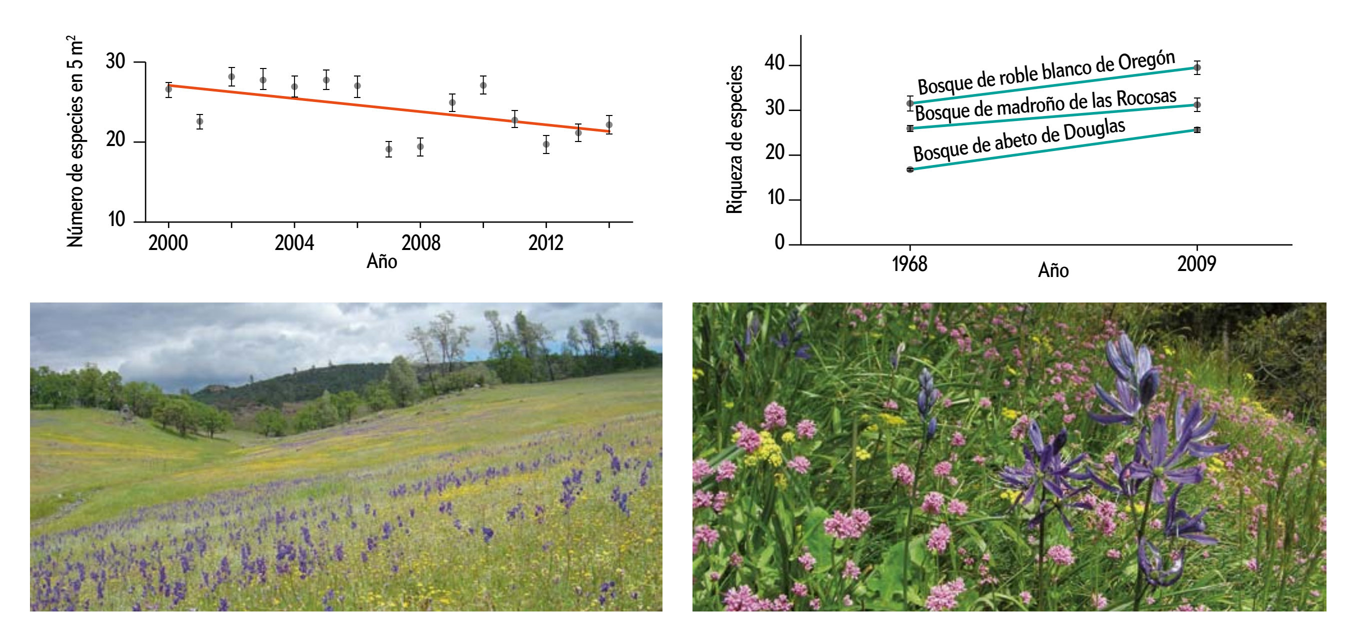
Una situación en que se hace evidente la pérdida de la biodiversidad local se da cuando la vegetación natural, como la de la selva tropical, deja paso a un monocultivo o a un aparcamiento. Pero si bien la agricultura es la principal culpable de la pérdida mundial de hábitats naturales, el vínculo entre el declive de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos no es tan sencillo en este caso. La gente transforma la vegetación natural en campos de cultivo para maximizar uno de los servicios brindados por los ecosistemas: la producción de alimentos. La conversión del suelo en tierras agrícolas a veces se produce a expensas de un coste excesivo en otros servicios ecosistémicos, como la estabilización del suelo y la calidad del agua, por lo que la siembra de cultivos mixtos (que conllevan una mayor biodiversidad), en lugar de monocultivos, constituye una estrategia plausible para paliar tales costes. Pero ¿cómo podemos comparar el beneficio relativo de miles de quintales de maíz con el de un arroyo con menos nitrógeno? Cuando no se tiene nada que echar a la boca, el cereal prevalece; con el estómago lleno, tal vez la mejor estrategia sea proteger la selva. En resumidas cuentas, no se puede propugnar una afirmación general acerca de si los servicios ecosistémicos aumentan o disminuyen en conjunto cuando la selva se transforma en un campo de cultivo. Además, parece más probable que los cambios en la función y los servicios ecosistémicos deriven sobre todo de la roturación, de dejar en barbecho el campo cada





EXPERIMENTOS como este de la Reserva Científica Ecológica de Cedar Creek, en Minnesota, muestran que la biodiversidad (en este caso, la riqueza de especies) aumenta las funciones ecosistémicas, como poner freno a la pérdida de nutrientes y aumentar la cobertura vegetal (lo que mejora la retención del carbono).

DE «PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY INFLUENCED BY BIODIVERSITY IN GRASSLAND ECOSYSTEMS». D. TILMAN, D. WEDIN Y J. KNOPS EN NATURE, VOL. 379, PÁGS. 718-720, 1996 (*gráficas inferiores*); FOTOGRAFÍA CORTESÍA DE DAVID TILMAN



EN UNA PRADERA DE CALIFORNIA, la diversidad vegetal ha ido a la baja como consecuencia del descenso de las lluvias (*izquierda*). En distintos tipos de bosques de la isla de Vancouver, en cambio, la diversidad ha crecido, en buena medida gracias a la colonización por especies adaptadas a las perturbaciones, tanto autóctonas como introducidas (*derecha*).

año y del crecimiento de plantas anuales, en lugar de árboles centenarios, que de la variación de la biodiversidad en sí.

Fuera de los campos agrícolas y de los aparcamientos, en los ecosistemas que no han experimentado una transformación drástica, los efectos de las especies introducidas, el calentamiento del clima y otros cambios ambientales que inciden en la biodiversidad son mucho más variables. Por ejemplo, en las praderas de California, el descenso de las lluvias parece haber causado el declive de la fitodiversidad local durante los últimos 15 años. En cambio, en los bosques de coníferas y en los bosques abiertos del sur de la isla de Vancouver la diversidad de la flora local aumentó entre 1968 y 2009: la creciente alteración asociada al desarrollo humano favoreció la colonización por especies adaptadas a las perturbaciones, tanto autóctonas como exóticas. Puesto que los experimentos que manipulan la biodiversidad no implican la transformación del hábitat, los datos aportados por el tipo de estudios que acabo de describir son sobre todo relevantes para evaluar los argumentos acerca de los vínculos causales reales de la biodiversidad con la función ecosistémica.

Durante el pasado lustro, varios metanálisis de gran entidad han sintetizado estudios como esos. En una serie superior a los 200 estudios que describían la riqueza de la flora terrestre en parcelas locales durante un período mínimo de cinco años, un grupo de investigadores observamos que no se había producido un cambio estadísticamente significativo en el número de especies a lo largo del tiempo. El mismo resultado ha sido referido por Maria Dornelas, de la Universidad de St. Andrews, y sus colaboradores a partir de 100 series cronológicas de riqueza específica y otros baremos de la biodiversidad en un abanico de hábitats terrestres y acuáticos repartidos por el planeta. Un estudio de Robin Elahi, de la Universidad Stanford, y colaboradores, centrado en los ecosistemas marinos costeros durante los últimos 50 años, halló un aumento medio neto de la riqueza local de especies en más de 400 series cronológicas, pero un descenso medio neto de esa medida en el subgrupo de estudios que analizó los impactos humanos más acusados, como la sedimentación y la contaminación. Todos esos trabajos revelan una variabilidad inmensa entre casos, pero sabemos muy poco acerca de las causas de esta variabilidad.

Los metanálisis sobre los cambios en la diversidad, basados en cientos de estudios y miles de puntos de muestreo, ponen en entredicho que la biodiversidad a escala local vaya a la baja. Los datos de partida tal vez se hayan obtenido con una representación desigual de las regiones geográficas o de los niveles de impacto humano. Lo mismo puede decirse, no obstante, de los experimentos que vinculan la biodiversidad con la función ecosistémica, que constituyen la otra mitad de la base científica sobre la que se sustenta el argumento de la conservación. En conjunto, los resultados aconsejan prudencia ante el riesgo de generalizar en exceso el argumento de que el declive de la biodiversidad natural es una causa importante de la degradación de los servicios ecosistémicos, un argumento que se sitúa en el centro mismo de las justificaciones tan aireadas en favor de la conservación de la misma.

«LA NATURALEZA ABORRECE EL VACÍO»

Si bien algunos entendidos se extrañan de que el declive de la biodiversidad global no se asocie por norma al de la biodiversidad local, otros opinan que los resultados no son sorprendentes. Tomando prestada una expresión latina propia de la física, *horror vacui*, el famoso ecólogo Joseph Grinnell afirmó en 1924: «La naturaleza aborrece el vacío en el mundo animado tanto como en el inanimado». Quería transmitir la idea de que cuando surgen oportunidades ecológicas, como la derivada de la desaparición de una especie, otras no tardan en ocupar su hueco en el ecosistema. Sucede, por ejemplo, cuando se crean monocultivos: el esfuerzo que supone mantener a raya las malas hierbas es tremendo. Cuando a la biodiversidad se la presiona, la madre naturaleza casi siempre reacciona.

En términos más generales, la teoría y ciertos datos empíricos sustentan la idea de un estado casi estable en la biodiversidad local, con la tendencia a que a las desviaciones de dicho estado les siga el retorno a largo plazo. Por supuesto, un cambio am-

GRÁFICAS ADAPTADAS DE «CLIMATE-DRIVEN DIVERSITY LOSS IN A GRASSLAND COMMUNITY», S. P. HARRISON ET AL. EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE U.S.A.*, VOL. 112, PÁGS. 8672-8677, 2015, Y DE «GAINS IN NATIVE SPECIES PROMOTE BIOTIC HOMOGENIZATION OVER FOUR DECADES IN A HUMANDOMINATED LANDSCAPE», J. L. MCCUNE Y M. VELLEND EN *JOURNAL OF ECOLOGY*, VOL. 101, PÁGS. 1542-1551, 2013. FOTOGRAFÍA SUPERIOR DE CATHY KOEHLER, POR CORTESÍA DE SUSAN HARRISON; FOTOGRAFÍA INFERIOR POR CORTESÍA DEL AUTOR

biental puede alterar ese nivel estacionario, pero las predicciones pueden ir en cualquiera de ambas direcciones. Por ejemplo, en un bosque del este de Norteamérica se podría esperar que el calentamiento del clima aumentase la diversidad botánica (los bosques meridionales son más diversos que los septentrionales), mientras que la deposición antropogénica del nitrógeno favorece claramente la dominancia competitiva de una o pocas especies, hecho que provocaría el descenso de la biodiversidad local. Lejos de simplificar deliberadamente el ecosistema con la siembra de un campo de maíz o la construcción de un centro comercial, el cambio ambiental propiciado por la actividad humana puede empujar la biodiversidad local y regional en cualquiera de las dos direcciones.

EL PROBLEMA CON LA BIODIVERSIDAD

Resulta perturbador cuando uno se percata de que la visión que tiene del mundo se tambalea; en mi caso tuve que asimilar pruebas que contradecían las ideas imperantes que se me impartieron hace más de veinte años sobre la biología de la conservación. La biodiversidad no está disminuyendo de forma generalizada en todas las escalas espaciales: los descensos en la escala global no suelen verse en la escala regional y solo ocurren en escenarios concretos en la escala local. Las actividades humanas no siempre van en detrimento de la biodiversidad: a veces sí, como en la transformación del bosque en cultivos, y a veces no, como cuando las especies exóticas duplican la riqueza florística de Nueva Zelanda y otras islas. Y las especies introducidas no son siempre dañinas, pues en ocasiones contribuyen notablemente tanto a la biodiversidad local y regional como a los servicios ecosistémicos, tales como la producción de alimentos o de maderas y fibras vegetales. Las gramíneas y las leguminosas que alimentan al ganado de Norteamérica proceden mayoritariamente de otros continentes (de Europa y Asia, sobre todo), al igual que el mismo ganado.

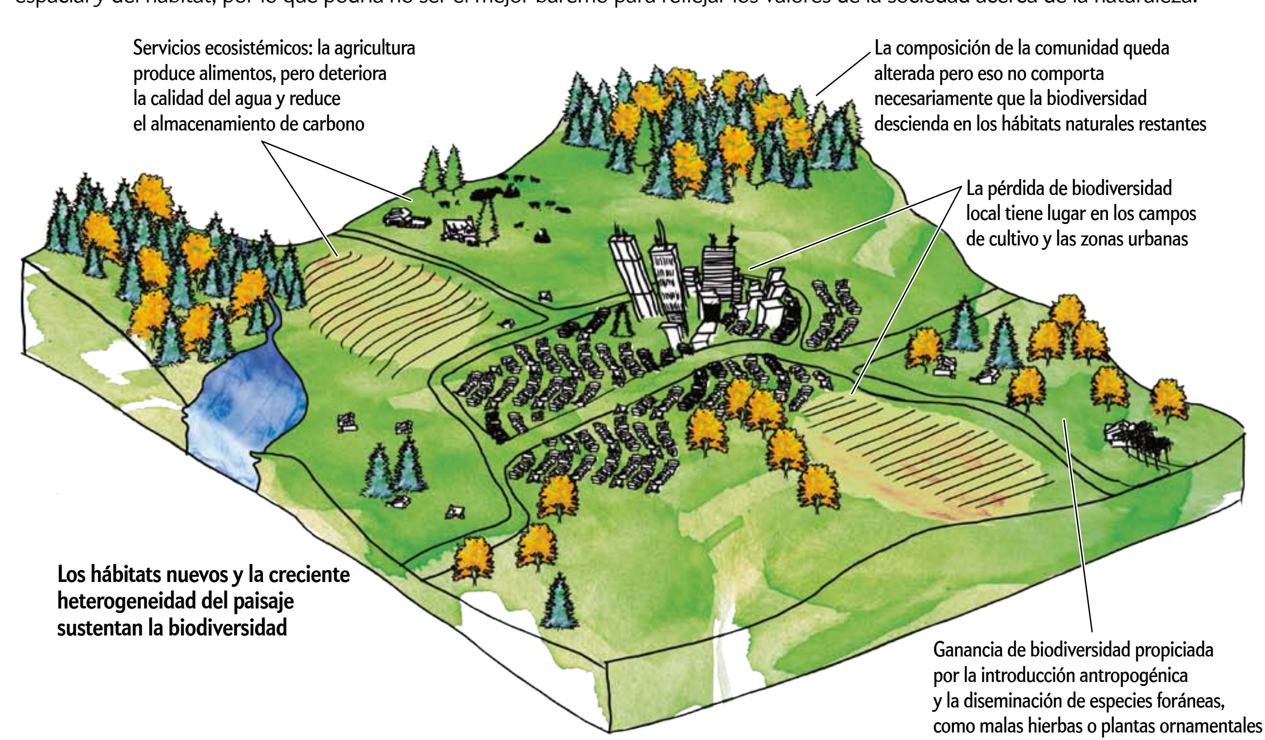
Volviendo a la paradoja de la conservación de la biodiversidad, ahora creo que tal vez su resolución no será posible si las definiciones científicas de la biodiversidad no consiguen captar lo que la gente realmente valora de la naturaleza. Si la biodiversidad se cuantifica de una forma objetiva como cierto aspecto de la variedad presente en una comunidad ecológica, entonces podría ser rica en un enclave al que se le podría haber asignado un escaso valor de conservación. En un viaje a Hawái recuerdo haber visto muchas aves en las tierras bajas, como cardenales norteños, tórtolas zenaidas y pinzones mexicanos, todas visitantes asiduas de mi jardín en Canadá y todas introducidas en el archipiélago desde otros lugares, lo que las convierte en parte del problema de conservación local. Pero si la biodiversidad se define como todo aquello que la gente aprecia de la naturaleza, en ese caso la ciencia no tiene nada que aportar a la cuestión de si tiene valor y de qué modo.

Para hablar claro, el argumento aquí no es que todo marcha bien en la ecología del planeta. Aunque se descubriese que la pér-

CRITERIOS DE VALORACIÓN

El valor desigual de la biodiversidad

El progreso humano aumenta la heterogeneidad del paisaje y ofrece servicios ecosistémicos únicos al mismo tiempo que impone costes ambientales. Todo ello ha de ser sopesado por la sociedad a la hora de decidir qué tierras es preciso conservar intactas y qué tierras conviene explotar y de qué modo. La biodiversidad puede aumentar, descender o permanecer igual en función de la escala espacial y del hábitat, por lo que podría no ser el mejor baremo para reflejar los valores de la sociedad acerca de la naturaleza.



SIGMA XI, *AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE*

dida de la biodiversidad no es en sí misma una causa importante de la alteración de los servicios ecosistémicos, seguirían siendo muchas las amenazas graves que se ciernen sobre el ambiente. El número de habitantes del planeta y el consumo per cápita de los recursos se conjugan para hacer harto improbable que las generaciones venideras puedan gozar del mismo grado de bienestar que el actual. Este problema queda patente si repasamos las estadísticas de los recursos renovables y agotables; también se refleja en los impactos de la actividad humana, que se aprecian en las imágenes de la superficie terráquea captadas desde el espacio. La temperatura del planeta está aumentando, hecho que agrava la probabilidad de olas de calor, sequías e inundaciones costeras. Muchas de las consecuencias que esos cambios tendrán para la biosfera se traducirán para la humanidad en cosechas ruinosas, en capturas pesqueras depauperadas o en el franco deterioro de la depuración natural de las aguas.

Lo que no está tan claro es si la biodiversidad, con su definición basada en criterios científicos, será un factor clave en arbitrar las consecuencias de los cambios globales para el bienestar humano. En las montañas situadas al norte de Vancouver, en la Columbia Británica, donde he vivido, las cuencas arboladas están protegidas porque abastecen de agua limpia a los habitantes de la ciudad. El bosque inalterado es esencial como fuente de esa agua depurada, pero parece improbable que el número de especies arbóreas sea tan importante. Después de todo, los bosques propios de la costa del estado presentan muy pocas.

Sospecho que los científicos albergan dudas más serias sobre la validez del argumento utilitarista en favor de la conservación de la biodiversidad que lo que sus escritos publicados dan a relucir. En su libro de 1996, *The idea of biodiversity*, David Takacs, entonces en la Universidad Cornell, entrevistó a destacados biólogos de la conservación y destapó una clara dicotomía entre las razones que los impulsaban a preocuparse por la biodiversidad y los motivos que esgrimían cuando pretendían convencer al prójimo. El impulso a menudo nacía de un amor por la naturaleza con claras raíces emocionales, por el cual, pongamos por caso, la pérdida de las aves endémicas de Nueva Zelanda nos entristecería profundamente. En cambio, a la hora de fomentar la conservación, sus entrevistados recurrían sobre todo al argumento utilitarista de que el empobrecimiento de la biodiversidad pondrá en peligro el bienestar del género humano, aunque no esté tan claro que la transformación de la biota de Nueva Zelanda merme ese bienestar.

En suma, el peso depositado sobre los hombros del concepto de la biodiversidad es excesivo, puesto que ha de representar todo lo que valoramos de la naturaleza y, al mismo tiempo, proveer un modo de cuantificar ese valor con sencillez y claridad. El concepto podría estar desmoronándose por su propio peso. Salvarlo podría requerir una delimitación más clara del papel de la ciencia en la conservación. Si, por ejemplo, una especie amenazada carece de un beneficio probado para el bienestar humano o siquiera indicios plausibles de ello, deberíamos reconocer con honestidad que la motivación para protegerla respondería a valores éticos. Es importante subrayar que tal honestidad pasa por admitir que la respuesta a la cuestión de lo que la sociedad debería hacer en una situación concreta (ante una especie en riesgo, en este caso) no le compete a la ciencia, por lo que los valores propios del científico no tendrían aquí más peso que los de cualquier otra persona. En cambio, los científicos tienen toda la legitimidad cuando se trata de impartir consejos destinados a lograr los objetivos de las políticas de conservación y de predecir las consecuencias de la actuación o la pasividad ante problemáticas diversas, como puedan ser la contaminación, el calentamiento global o el cambio en el uso del suelo.

En lo referente a la descripción o la predicción de las consecuencias del cambio ambiental provocado por la humanidad, creo que es posible salvaguardar la credibilidad científica si se mantienen los juicios de valor apartados de la cuantificación de la biodiversidad o, por lo menos, si se señalan a las claras aquellas conclusiones que incorporen tales juicios. Yo mismo he pecado de no recalcar las decisiones condicionadas por valores en mis estudios. En mi tesis doctoral, que versaba sobre la influencia de los usos agrícolas del suelo a lo largo de la historia sobre la flora forestal del estado de Nueva York, describí cambios en la biodiversidad, a pesar de que había excluido de forma intencionada las especies características de los campos abiertos, que probablemente se beneficiarían del cambio ambiental. Para un lector fortuito (la mayoría), me aseguré así de que todo tuviera el aspecto de una degradación generalizada de la biodiversidad, cuando en realidad la diversidad vegetal podría estar mostrando una respuesta distinta.

Creo que el ejemplo de mi tesis doctoral es representativo de numerosos estudios similares que, con la introducción de juicios de valor en los cálculos, han logrado que sus conclusiones justifiquen aparentemente los valores. Hoy calificaría el declive que observé en su día como una pérdida de plantas netamente forestales, no como un empobrecimiento de la diversidad general, a menos de que dispusiera de datos relativos a todas las especies presentes a lo largo del tiempo que evidenciaran un declive. De ese modo, habría mucha mayor transparencia en torno a los valores que se contemplan cuando se elabora cualquier práctica de conservación basada en esta investigación. Me preocupa que el saber convencional que fue rebatido por los estudios de Dov Sax y otros (pero que aún subsiste considerablemente) descansara en fundamentos consistentes en una extraña mezcla de valores humanos y datos.

En mi experiencia, cualquier resultado que se opone a la narrativa de la crisis de biodiversidad es recibido con un coro de réplicas que comienza con un «sí, pero...». Como ese escéptico profesional que todo científico debiera ser, creo que la ecología y la biología de la conservación se verían enormemente beneficiadas si esa actitud de «sí, pero...» la aplicáramos sistemáticamente no solo a los resultados que no encajan con nuestros valores personales, sino también a aquellos que coinciden con ellos. Yo, desde luego, ya he comenzado a hacerlo. IyC

PARA SABER MÁS

Species diversity: From global decreases to local increases. D. F. Sax y S. D. Gaines en *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 18, págs. 561-566, 2003.
Biodiversity loss and its impact on humanity. B. J. Cardinale et al. en *Nature*, vol. 486, págs. 59-67, 2012.
What's so good about biodiversity? A call for better reasoning about nature's value. D. S. Maier. Springer Netherlands, Nueva York, 2012.
Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. T. Newbold et al. en *Nature*, vol. 520, págs. 45-50, 2015.
Plant biodiversity change across scales during the Anthropocene. M. Vellend et al. en *Annual Review of Plant Biology*, vol. 68, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Conservación de la biodiversidad. Stuart L. Pimm y Clinton Jenkins en *IyC*, noviembre de 2005.
Especies invasoras. Robert Barbault y Anne Teyssèdre en *Conservación de la biodiversidad*, colección *Temas* de *IyC* n.º 61, 2010.

por Aline Raynal-Roques y Albert Roguenant

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Las flores, como las ve una abeja

La capacidad de percibir la luz ultravioleta confiere a los insectos una visión de las flores muy distinta a la nuestra

La mayoría de las plantas necesita recibir polen para reproducirse, con preferencia de otra planta. A ese transporte contribuyen a menudo los insectos, que hallan en las flores alimento en forma de polen o néctar.

A lo largo de la evolución, las plantas han desarrollado distintos mecanismos para atraer y guiar a los insectos hacia el polen. Por lo que respecta a la atracción visual, la luz ultravioleta, cuya energía equivale al 5 por ciento de la luz del día, tiene un protagonismo destacado: muchos insectos, y en especial los himenópteros, a los que pertenecen las abejas, pueden percibirla, a diferencia del ser humano.

Gracias a los tres picos de sensibilidad de sus ojos (amarillo-verde, azul y ultravioleta), las abejas captan los colores de las flores de forma muy distinta a la nuestra. Aun así, es posible formarse una idea aproximada de lo que ven las abejas iluminando la flor tan solo con luz ultravioleta. Las estructuras y los pigmentos de los distintos órganos florales absorben en parte esa radiación incidente y la convierten parcialmente (por fotoluminiscencia) en luz visible que es reemitida. El observador humano puede entonces contemplar la flor con sus «nuevos» colores y fotografiarla.

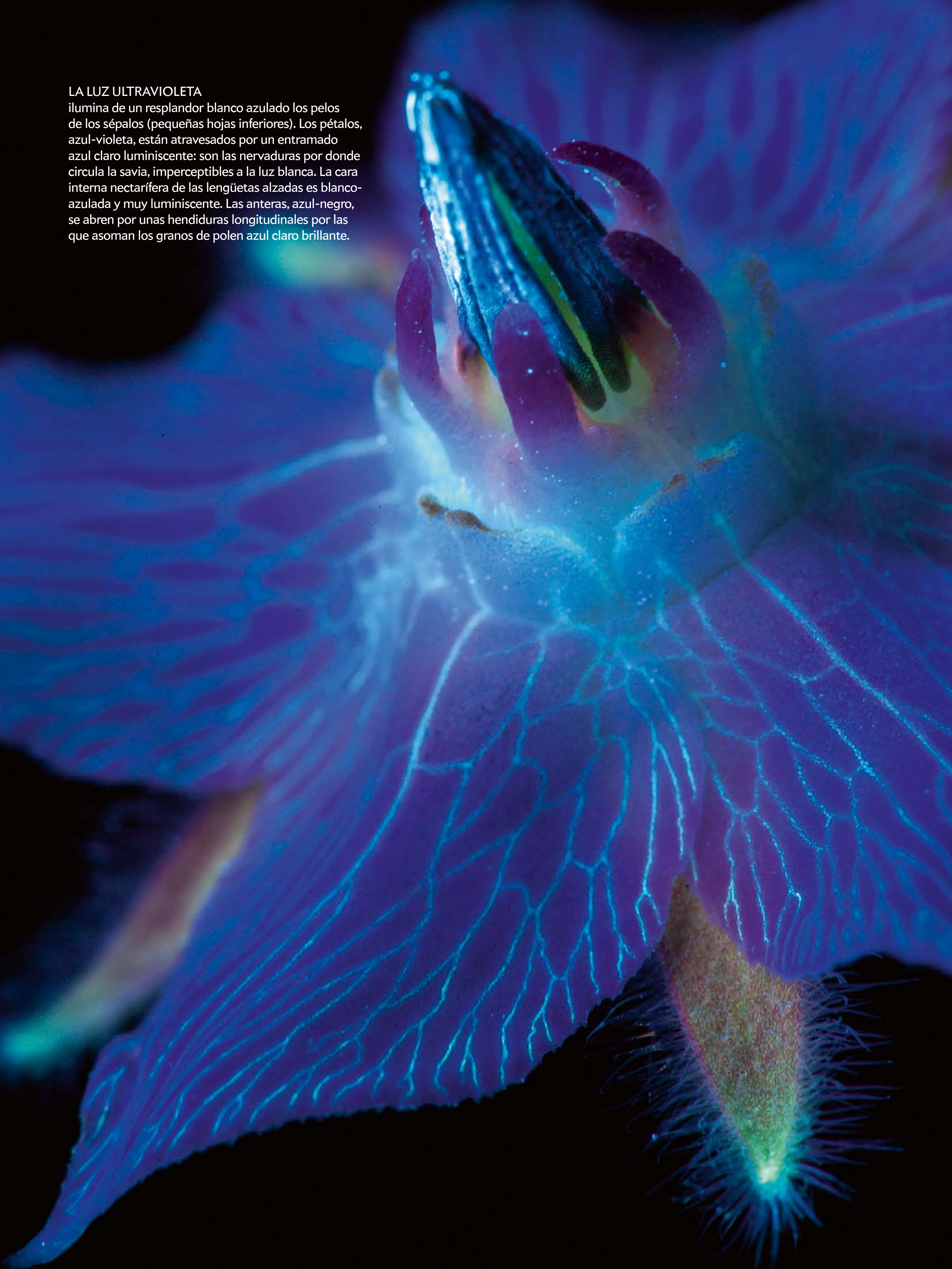
Es lo que hemos hecho con varias especies de plantas. Para ello, utilizamos una cámara digital y, como fuente de luz ultravioleta, dos tubos fluorescentes compactos que emiten, sobre todo, rayos ultravioleta A cercanos al espectro visible. Las fotografías se toman en condiciones de oscuridad total.

Los resultados son sorprendentes. Revelan que los colores de las flores bajo la luz ultravioleta son, a veces, muy distintos de los colores vistos a la luz del día. También demuestran que flores del mismo color adquieren, en ocasiones, colores diferentes cuando se iluminan con luz ultravioleta. Además del placer estético que proporcionan, las fotografías dejan al descubierto las señales y los atractivos visuales que guían a los insectos hacia los órganos florales implicados en la reproducción de la planta.

—Aline Raynal-Roques
Profesora del Museo Nacional de Historia Natural de París
—Albert Roguenant
Entomólogo y botánico experto en bromeliáceas



BORRAJA (*BORAGO OFFICINALIS*)
Vistas a la luz natural, las flores de esta planta herbácea son azul-malva; en la base de cada uno de sus cinco pétalos unidos se eleva una lengüeta blanca y gruesa de punta marrón cuya cara interna es nectarífera. En el centro de la flor, los estambres (órgano masculino) presentan anteras (donde se halla el polen) negras que se alzan formando un cono estrecho rodeado de apéndices erguidos de color púrpura.



LA LUZ ULTRAVIOLETA
ilumina de un resplandor blanco azulado los pelos de los sépalos (pequeñas hojas inferiores). Los pétalos, azul-violeta, están atravesados por un entramado azul claro luminiscente: son las nervaduras por donde circula la savia, imperceptibles a la luz blanca. La cara interna nectarífera de las lengüetas alzadas es blanco-azulada y muy luminiscente. Las anteras, azul-negro, se abren por unas hendiduras longitudinales por las que asoman los granos de polen azul claro brillante.



HIEDRA (*HEDERA HELIX*)
Bajo la luz natural (*izquierda*), las flores verde-amarillo de la hiedra, coronadas por las cinco anteras amarillas de los estambres, se abren en otoño. En el centro de la flor, el estilo (órgano femenino), receptor del polen, está rodeado por un disco que segrega néctar.

La luz ultravioleta (*abajo*) permite diferenciar los pétalos, que se vuelven azul-malva, del disco nectarífero, de color verde-azul. Las anteras blanco-amarillas dejan al descubierto el polen luminiscente. La luminiscencia del disco nectarífero y de la aureola de cinco anteras atrae al insecto. Cuando acuda a alimentarse se topará con las anteras y se llevará adherido el polen.

EN EL GIRASOL (*HELIANTHUS ANNUUS*) la flor corresponde en realidad a un disco de múltiples flores muy pequeñas en cuya periferia hay flores amarillas en forma de lengüeta que parecen pétalos (*derecha*).

La luz ultravioleta (*arriba*) revela cinco estadios de la floración: botones florales en el centro; flores abiertas con anteras azul intenso recubiertas por polen blanco luminiscente; flores que han perdido el polen con anteras azul intenso coronadas por estigmas amarillos luminiscentes; flores marchitas que solo conservan las anteras azules; y, finalmente, flores en forma de lengüeta. La diferencia entre la floración masculina y femenina solo puede apreciarse bajo la luz ultravioleta.



por Partha Mitra



Partha Mitra es profesor Crick-Clay de biomatemáticas en el Laboratorio de Cold Spring Harbor y profesor visitante H. N. Mahabala en el Instituto Indio de Tecnología Madrás. Obtuvo un doctorado en física teórica en Harvard y trabajó en neurociencia cuantitativa e ingeniería teórica en los Laboratorios Bell. Actualmente se dedica a cartografiar circuitos cerebrales del ratón y el tití.

¿Está la neurociencia limitada por las herramientas o por las ideas?

Buscando una salida de las trampas conceptuales del campo

Los patrones intrincados y simétricos, en azulejos y estucos, cubren las paredes y los techos de la Alhambra, el «fuerte rojo», el castillo de ensueño de los reyes árabes medievales de Andalucía. Aparentemente infinitos en su variedad, los dos patrones periódicos bidimensionales están, sin embargo, gobernados por los principios matemáticos de la teoría de grupos y pueden clasificarse en un número finito de tipos: exactamente diecisiete, como mostró el cristalógrafo ruso Evgraf Fedorov. Es poco probable que los artistas de la Andalucía medieval estuvieran al tanto de las matemáticas de los grupos espaciales, y Fedorov desconocía el arte de la Alhambra. Los dos mundos se encontraron en 1943 en la tesis doctoral de la astrónoma suiza Edith Alice Muller, quien contó once de los diecisiete grupos del plano en los adornos del palacio (desde entonces se han contado más). Los diecisiete grupos espaciales también se pueden encontrar en los patrones periódicos del papel pintado japonés.

Sin intención consciente o conocimiento explícito, los artistas de distintas culturas y épocas han tenido que ajustar sus creaciones a las limitaciones de la periodicidad en el espacio euclídeo bidimensional; sus obras han estado, por tanto, sometidas a una teoría matemáticamente precisa. ¿Se aplica lo mismo a las «infinitas formas más bellas» creadas por la evolución biológica? ¿Hay principios teóricos, idealmente principios que puedan formularse en términos matemáticos, subyacentes a la desconcertante complejidad de los fenómenos biológicos? Sin la guía de tales principios, solo generamos colecciones digitales de mariposas cada vez mayores con herramientas cada vez mejores. En un artículo publicado en *Neuron*, John W. Krakauer, de la Universidad Johns Hopkins, Alex Gómez Marin, del Instituto de Neurociencias del CSIC en Alicante, y otros colaboradores defienden que al marginar la etología (el estudio de las conductas adaptativas de los animales en su entorno natural), la neurociencia moderna ha perdido un marco teórico clave. El marco conceptual de la etología contiene en sí las semillas de una futura teoría matemática que podría unificar la complejidad neurobiológica, al igual que los grupos de simetría de Fedorov unificaron los patrones de la Alhambra.

Los problemas de ignorar a Darwin

La falta contemporánea de análisis etológico es parte de un déficit mayor. La selección natural de Darwin, posiblemente el marco teórico más importante de la biología, brilla por su ausencia en la neurociencia moderna. La teoría de Darwin se apoya en dos principios básicos: la generación no guiada de variación hereditaria y la selección de tal variación por un nicho ambiental para producir rasgos adaptativos. La función del cerebro animal es permitir comportamientos adaptativos. Es, pues, razonable defender que un estudio de estos «comportamientos naturales» debería guiar el estudio experimental de los circuitos cerebrales. De hecho, esta fue la premisa del campo de la etología desarrollado por Niko Tinbergen, Konrad Lorenz y Karl von Frisch (merecedores del premio Nobel de medicina en 1973 por sus hallazgos sobre el comportamiento animal) a mediados del siglo xx. Los estudios de campo observacionales sobre los comportamientos naturales fundamentales, como el apareamiento, la agresión y el aprendizaje en el período crítico, por parte de los etólogos, permitieron el esclarecimiento posterior de los circuitos neuronales subyacentes por parte de los neuroetólogos.

En contraste con ese método empírico de observación de un animal que muestra un comportamiento libre en su nicho adaptativo (ambiente natural) se hallan el enfoque experimental controlado desarrollado por Iván Petróvich Pávlov y Burrhus Frederic Skinner para estudiar comportamientos condicionados y los tests psicofísicos que emplean los psicólogos experimentales para caracterizar la percepción. El enfoque de Pavlov y Skinner se inspira en la física, con su énfasis en aislar un sistema de influencias externas. El animal se coloca en un entorno controlado, sometido a estímulos simples, y se le restringe mucho su comportamiento (por ejemplo, se le fuerza a elegir entre dos alternativas). En la mayoría de los estudios neurocientíficos contemporáneos se utiliza el enfoque experimental controlado del comportamiento; el análisis etológico asume un papel secundario. Según Krakauer y sus colaboradores, el poner el acento en la construcción de herramientas y la recolección de grandes conjuntos de datos neuronales, y descuidar los conocimientos etológicos básicos ha llevado al campo por mal camino.

El motivo por el que se ha adoptado el enfoque actual es que los registros detallados de la actividad neuronal (correlatos neuronales), asociada al comportamiento, así como las intervenciones en la conducta por medio de la manipulación de circuitos neuronales, van más allá de la mera descripción del comportamiento y, por tanto, proporcionan un mayor poder explicativo. Krakauer y sus colaboradores desafían a esta escuela de pensamiento y sostienen que ningún método es fructífero si antes no se comprenden los comportamientos naturales por sí mismos, para establecer un contexto teórico y un diseño experimental guía. Las herramientas que permiten registrar y manipular la actividad neuronal no pueden sustituir al análisis etológico, e

incluso puede que obstaculicen el progreso al proporcionar una narración falsa de la explicación «intervencionista-causal».

La concreción inapropiada en el registro y manipulación de la actividad neuronal puede conducir a la falacia mereológica, que atribuye incorrectamente a una parte de un sistema una propiedad del conjunto. Los críticos apuntan a las populares neuronas espejo como ejemplo. Cuando un primate realiza una tarea, estas muestran la misma actividad que cuando el animal observa a un actor diferente realizando la misma tarea. Sin embargo, esta coincidencia parcial entre actividades neuronales no implica en sí misma ninguna semejanza del estado psicológico entre el observador y el actor. Sería, por tanto, un error conceptual utilizar la actividad de las neuronas espejo como un representante (*proxy*) intercambiable por el estado psicológico. Krakauer y sus colaboradores sostienen que en la bibliografía predomina tal error.

En general, es imposible obtener una medición sistémica completa de la actividad neuronal. Incluso los mejores esfuerzos actuales para medir la actividad de miles de neuronas no alcanzan a registrar la actividad eléctrica de sistemas nerviosos enteros, que incluyan todos los axones, las dendritas y los mensajes químicos. No hay manera de escapar a la necesidad de generalizar a partir de observaciones neuronales parciales. Estas generalizaciones son frágiles y puede que no proporcionen idea alguna sobre el comportamiento adaptativo, a menos que los experimentos estén cuidadosamente diseñados y tomen explícitamente en cuenta esos comportamientos. Ignorar a Darwin no es una buena receta para el éxito a la hora de obtener conocimiento biológico. A la inversa, el diseño experimental etológicamente informado, junto con las mediciones y perturbaciones de las actividades neuronales, puede conducir a un mejor entendimiento. Así lo demuestran los estudios de bradicinesia en la enfermedad de Parkinson, de la localización del sonido en lechuzas comunes, de la navegación de los peces eléctricos o del aprendizaje motor.

Comportamientos emergentes

La llamada a volver a concentrarse en los comportamientos naturales es oportuna, pero no realmente controvertida. Sin embargo, este grupo de críticos pasan a hacer afirmaciones más fuertes con respecto a los comportamientos como fenómenos «emergentes» que no pueden, ni siquiera en principio, explicarse en términos neuronales. Aquí entran en un terreno más inestable. Afirmaciones cuasimísticas relativas a la emergencia en biología son endémicas en la bibliografía y recuerdan incómodamente nociones descartadas del dualismo cartesiano y el vitalismo bergsoniano. En apoyo de su argumento, se refieren al comportamiento colectivo de las bandadas de aves, que muestran patrones espaciotemporales a gran escala (murmuraciones) que no son obvios en el comportamiento de un ave o de unas pocas. Pero se trata de un razonamiento claramente falaz, como mostró el periodista científico Ed Yong en un comentario publicado en la revista cultural *The Atlantic*. Yong señala que los patrones pueden reproducirse en modelos simples de comportamiento de bandada (*flocking*), con reglas elementales que dictan el comportamiento de vuelo de aves individuales en el contexto de sus vecinas. Ello concuerda con innumerables estudios realizados a lo largo del siglo XX. Se ha observado en repetidas ocasiones que los patrones aparentemente complejos pueden ser explicados por reglas simples y locales.

Estos ejercicios demuestran que el comportamiento colectivo complejo de los sistemas puede explicarse mediante reglas simples de interacciones entre los elementos del sistema. Arrancando la derrota de las fauces de la victoria, Yong concluye que «nunca se hubiera podido predecir esto (el patrón del comportamiento de bandada) a partir de aquello (las reglas simples)». Pero fue precisamente esto lo que hicieron los modelos computacionales citados, es decir, ¡los patrones de comportamiento de bandada fueron predichos por reglas simples! Quizá lo que está implícito es que el resultado del modelo no es «obvio» en un sentido subjetivo: es decir, es posible que no podamos hacer los cálculos en nuestra cabeza para conectar los puntos entre las reglas de interacción y los comportamientos colectivos (aunque esto puede discutirse; uno puede desarrollar la intuición a través de cálculos teóricos apropiados, con lápiz y papel, del tipo de los del siglo XIX, de la época anterior a los ordenadores). Sin embargo, esa es una afirmación sobre nuestros sentimientos subjetivos acerca del tema y no tiene nada que ver con la pregunta de principio sobre si las reglas simples de interacción conducen a comportamientos macroscópicos complejos. Ahora sabemos que sí. Elaborar las conexiones entre los detalles



BAJO LOS PATRONES DE LOS AZULEJOS que decoran la Alhambra subyacen los grupos de simetría que Evgraf Fedorov descubrió mediante el estudio de los cristales.

microscópicos y los comportamientos macroscópicos puede que sea desafiante en la práctica, pero se ha dado un gran progreso teórico en esta cuestión, y no existe una brecha explicativa de principio entre lo microscópico y lo macroscópico.

El debate teleológico

Dejando de lado el embuste de la emergencia, a Krakauer y sus colaboradores se les ocurrió un asunto central que vale la pena ampliar. El problema de la explicación mecanicista-reduccionista de los sistemas nerviosos no es que exista una brecha *en principio* entre los detalles neuronales microscópicos y los comportamientos macroscópicos (emergencia), sino que este estilo de explicación está en gran parte divorciado de la teoría de Darwin de la selección natural. Esto es particularmente evidente en la falta de conductas de adaptación al nicho en un contexto experimental. Como es habitual en la bibliografía neurocientífica, al comparar el estilo «cómo» (mecanicista) de la explicación con el estilo «por qué» (adaptativo) de la explicación de la conducta, estos autores invocan el nivel computacional de análisis de David Marr y las «causas últimas» de Tinbergen. Marr define tres niveles de análisis: cálculo (problema que hay que resolver), algoritmo (reglas) e implementación (física). El análisis del comportamiento de Tinbergen se separa en explicaciones «próximas», o mecánicas, y «últimas», o adaptativas. Sin embargo, uno podría también ir directamente a Darwin, ya que el contexto es más amplio que el de las explicaciones computacionales o la etología, y se origina en una tensión fundamental entre las ciencias biológicas y las físicas.

Las preguntas relativas a la «función» (en el sentido de «propósito») pertenecen exclusivamente al dominio biológico. El exorcismo de las consideraciones teleológicas fue central para la física moderna; una explicación como «el propósito del Sol es dar luz» no tiene cabida en un libro de texto de física. Sin embargo, una declaración con el mismo estatuto epistemológico como «la función de la hemoglobina es transportar oxígeno» no sería nada controvertida en un libro de biología. Esta disonancia cognitiva entre el estatuto de las explicaciones teleológicas en las dos ciencias tiene raíces históricas. La teleología biológica de Aristóteles contrastaba con el atomismo físico de Demócrito. El contraste teleología-atomismo en la comprensión de la naturaleza no es específico de la filosofía griega clásica; ocurre también en la filosofía hindú clásica. El papel de la «función» sigue siendo debatido en la filosofía contemporánea de la biología. El neurocientífico que trabaja sobre el terreno puede que considere estas discusiones filosóficas como una pérdida de tiempo —o, peor, como un criptovitalismo—. Sin embargo, como muestra la reciente controversia sobre la definición de «función» del ADN en el proyecto ENCODE [*véase* «La función reguladora del genoma», por Rafael R. Daga, Silvia Salas-Pino y Paola Gallardo; Investigación y Ciencia, diciembre de 2013], la falta de acuerdo sobre este concepto entraña consecuencias prácticas para la comunidad científica.

> No podemos abrirnos paso a la fuerza a través de las complejidades de los sistemas nerviosos. No hay duda de que necesitamos mejores herramientas, pero la mejor que tenemos tal vez resida en nuestro propio cráneo

Un tratamiento más satisfactorio de la «función» podría disipar gran parte de la confusión teórica en la comprensión de la complejidad del cerebro. Ya existen explicaciones conceptuales coherentes. Biólogos como Ernst Mayr han distinguido entre «teleología cósmica», que corresponde a un propósito inherente de la naturaleza que no tiene lugar en la ciencia moderna, y «teleonomía», o el propósito aparente ejemplificado en programas genéticos evolucionados mediante la selección natural. El comportamiento animal en la vida de un individuo es altamente intencional; ejecuta conductas programadas adaptadas a nichos ecológicos. El programa de instrucciones o el código genético mismo, por supuesto, cambian a lo largo de escalas de tiempo evolutivas. La plasticidad del sistema nervioso, tanto durante su desarrollo como en su fase adulta, no niega la existencia de comportamientos adaptativos específicos de las especies; de hecho, la plasticidad misma es un mecanismo evolucionado específico de la especie (como se ilustra en la evolución convergente del aprendizaje vocal en múltiples taxones, incluidos humanos y aves canoras).

Existen fragmentos de una «teoría del diseño» que trata directamente con los asuntos teleonómicos, incluidas las consideraciones etológicas y las explicaciones computacionalistas a las que se hace referencia en el artículo de Krakauer. Sin embargo, sin una iniciativa teórica más robusta, matemáticamente sólida y conceptualmente coherente que tenga un mejor poder explicativo y proporcione orientación para el diseño experimental, es probable que estemos mirando durante mucho tiempo los intrincados patrones del tapiz neurobiológico sin descubrir las simplicidades subyacentes.

¿Cuál es el camino? Fedorov descubrió las matemáticas de los grupos espaciales que gobiernan los patrones de la Alhambra mediante el estudio de los cristales en vez de visitando el palacio. Es posible que los principios matemáticos subyacentes que gobiernan sistemas biológicos que aparentemente tienen un propósito tengan su propia lógica intrínseca y puedan ser descubiertos de forma independiente en un dominio diferente. Esta es, de hecho, la esperanza de los investigadores en el campo del aprendizaje automático moderno, que intentan descubrir los principios abstractos de la inteligencia en un contexto tecnológico en gran medida eliminado de la neurociencia. Los ingenieros humanos, al tratar de resolver problemas que a menudo se parecen a aquellos que los sistemas nerviosos animales pueden haber encontrado en sus nichos adaptativos, han elaborado marcos teóricos con principios matemáticos. Estas teorías de la ingeniería incluyen de modo clásico las tres ces (*comunicaciones, computación y control*) y habría que agregar *estadística* o *aprendizaje automático*. Si bien se enseñan en diferentes departamentos de las universidades, el contexto moderno de sistemas interconectados y redes distribuidas también ha unido las disciplinas en una mezcla que está lista para conectarse con la neurociencia.

El peligro de las metáforas

De todas las metáforas ingenieriles utilizadas en neurociencia, la computadora ha sido la dominante. Sin embargo, podría ser un error: si bien es la más popular en los libros de texto cuando hablan del cerebro, las teorías de la computación (tal como se sustancian en el modelo de Turing o la arquitectura de computadoras de Von Neumann, que separa los procesadores de la memoria) han tenido muy poco éxito a la hora de proporcionar una comprensión biológica de la función cerebral o una guía experimental para el neurocientífico. Ello explicaría los resultados negativos del estudio de Eric Jonas y Konrad Paul Kording publicado en *PLOS Computational Biology*, donde los métodos de análisis estándar utilizados por los neurocientíficos no tuvieron éxito a la hora de arrojar conocimiento en la arquitectura de una computadora programada para jugar un videojuego.

Este trabajo ha llevado a mucha autoflagelación, pero los métodos de análisis de datos de la neurociencia realmente han tenido mucho éxito en la exploración de otra metáfora ingenieril para los sistemas nerviosos: a saber, el procesamiento de señales e imágenes, por lo general estudiado en el contexto de las comunicaciones o el control. Paradigma de este éxito es nuestra comprensión del sistema visual de los primates, que ahora ha dado fruto en una multimillonaria industria de visión artificial. Si los métodos de análisis de datos de la neurociencia fallan en la comprensión de una arquitectura de computadoras de Von Neumann que separa el procesador de la memoria y usa elementos precisos, eso no es tan grave, ya que nadie espera que el cerebro se ajuste a esa arquitectura en modo alguno. Resulta significativo que los avances modernos en aprendizaje automático hayan venido de un abandono de los métodos digitales de inteligencia artificial de la ciencia computacional tradicional basados en reglas, y de una adopción de los métodos analógicos basados en la teoría de la probabilidad y el álgebra lineal, más propios de estadísticos, físicos y teóricos del control. Demandar investigación interdisciplinar es un cliché, pero es poco probable que el marco teórico que necesitamos para la neurociencia esté basado en un departamento académico existente.

La neurociencia moderna necesita pluralismo, no solo en el plano epistemológico, como exigen Krakauer y sus colaboradores, sino también en la diversidad de especies estudiadas. El equivalente biológico de la teorización de la ingeniería es el método comparativo que examina una amplia gama de especies en todos los taxones para encontrar principios transversales. El método comparativo ha estado en declive durante décadas, bajo la presión de la expansión de los estudios de unos pocos organismos modelo, particularmente aquellos adecuados para la investigación médica traslacional. El impulso de construcción de herramientas ha forzado aún más este declive: ahora estudiamos el sistema visual del ratón, no porque la visión sea una adaptación al nicho primaria para esta especie (una máxima etológica conocida como principio de Krogh), sino simplemente porque disponemos de complejas herramientas genéticas.

No podemos abrirnos paso a la fuerza a través de las complejidades de los sistemas nerviosos. No hay duda de que necesitamos mejores herramientas, pero la mejor que tenemos tal vez resida en nuestro propio cráneo. Si no hay principios teóricos profundos por descubrir en el estudio de los sistemas nerviosos animales, entonces estamos condenados a catalogar la gran variedad de detalles característica de la biología, y dominarán las herramientas. La esperanza es que, bajo las finitas y bellas formas producidas por la lucha por la existencia, haya simplicidades matemáticamente cuantificables, «terribles simetrías», en palabras de William Blake. Entonces, las ideas triunfarán. IyC

PARA SABER MÁS

What makes biology unique? Ernst Mayr. Cambridge University Press, 2007.

Could a neuroscientist understand a microprocessor? Eric Jonas y Konrad Paul Kording en *PLOS Computational Biology*, vol. 13, art. e1005268, enero de 2017.

Neuroscience needs behavior: Correcting a reductionist bias. John W. Krakauer et al. en *Neuron*, vol. 93, págs. 480-490, febrero de 2017.

How brain scientists forgot that brains have owners. Ed Yong en *The Atlantic*, 27 de febrero de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El lenguaje de la neurociencia. Christian Wolf en *MyC* n.º 70, 2015.

Una ciencia controvertida. Steve Ayan en *MyC* n.º 73, 2015.

Naturaleza y finalidad. Héctor Velázquez Fernández en *IyC*, mayo de 2015.

por Fernando T. Maestre

Fernando T. Maestre es catedrático de Ecología en la Universidad Rey Juan Carlos, donde dirige el Laboratorio de Ecología de Zonas Áridas y Cambio Global.



El riesgo de la desertificación

¿Puede desertificarse España si a la vez aumenta su cobertura vegetal?

Con frecuencia oímos o leemos noticias sobre dos procesos en principio antagónicos: por un lado, la creciente desertificación en España como consecuencia del cambio climático y los incendios forestales y, por otro, el aumento de su superficie forestal. ¿Cómo se explica esta aparente contradicción?

Según los datos del último Inventario Forestal Nacional, durante los últimos 25 años la superficie forestal de nuestro país ha aumentado a un ritmo de 180.000 hectáreas por año. Un factor clave de ello ha sido el abandono de numerosos campos de cultivo como consecuencia del éxodo del campo a la ciudad y del envejecimiento generalizado de la población en las zonas rurales. Estos campos son colonizados por vegetación herbácea y leñosa, particularmente en las zonas adyacentes a las masas forestales.

El avance de la superficie forestal se ha visto favorecido por el aumento en la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera derivado, entre otros factores, de la quema de combustibles fósiles. Durante la fotosíntesis las plantas abren sus estomas para captar CO_2 y al hacerlo pierden agua debido a la demanda evaporativa de la atmósfera. Al aumentar el CO_2 atmosférico, pueden captar la misma cantidad del gas abriendo menos tiempo sus estomas y, por ende, perdiendo menos agua. Y, al disponer de más agua, pueden mantenerse activas más tiempo, en especial en las zonas de baja disponibilidad hídrica.

A ello hay que añadir la mayor duración de la estación de crecimiento vegetal porque las temperaturas de otoño y primavera se han vuelto más suaves (debido al cambio climático). Ello está permitiendo que muchas especies caducifolias mantengan sus hojas durante más tiempo y que numerosas especies herbáceas y leñosas estén creciendo a un ritmo más rápido de lo que lo hacían en el pasado.

Pese a lo expuesto, queda por ver si la mayor eficiencia en el uso del agua por las plantas puede contrarrestar su menor disponibilidad por el ascenso de las temperaturas y la reducción de la precipitación derivados del cambio climático. Distintos estudios apuntan a disminuciones importantes en la humedad del suelo —particularmente durante el verano— y en la recarga de acuíferos en extensas regiones españolas hacia finales de siglo, sobre todo en el sur y sudeste peninsular, lo que sin duda limitará el crecimiento de su vegetación. Es por ello que, al igual que cuando contratamos un producto bancario debemos saber que las «rentabilidades pasadas no garantizan rentabilidades futuras», no podemos asegurar que el incremento en la superficie forestal observado hasta la fecha pueda seguir manteniéndose en el futuro, al menos en las zonas con menor disponibilidad hídrica.



EL SOBREPASTOREO practicado desde hace milenios ha contribuido a la desertificación de nuestro territorio.

Por su parte, la desertificación se define, según Naciones Unidas, como la «reducción o pérdida de productividad biológica o económica (y de complejidad) de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de factores tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas». Se trata, pues, de un tipo de degradación ambiental que afecta a lugares con estas condiciones climáticas. Nuestro país es especialmente vulnerable a la desertificación, puesto que unas tres cuartas partes de su superficie presentan este tipo de clima.

Las actividades humanas son el principal desencadenante de la desertificación en España. Los estudios más recientes indican que un 20 por ciento de su territorio se ha degradado como consecuencia de nuestras actuaciones a lo largo de milenios. Entre ellas, cabe citar la tala de bosques y el sobrepastoreo, además del uso de técnicas de cultivo inapropiadas —como los cultivos en zonas de elevada pendiente— y la sobreexplotación de los acuíferos. Esos estudios señalan, en cambio, que en la actualidad solo está degradándose el 1 por ciento de nuestra superficie. No obstante, es más que probable que esta cifra se incremente en el futuro debido al calentamiento global y al aumento de la frecuencia y duración de las sequías, las olas de calor y las precipitaciones extremas asociadas al cambio climático, que a su vez favorecerán los grandes incendios forestales y la erosión del suelo. Todo ello llevará a una mayor presión por la utilización de los recursos que, como el agua, cada vez se volverán más escasos. Así, varias simulaciones realizadas por investigadores de la Estación Experimental de Zonas Áridas, en Almería, indican que los cultivos de trigo-girasol de la provincia de Córdoba colapsarán en un plazo de 61 años, mientras que los de maíz sufrirán reducciones en su producción superiores al 25 por ciento en muchas zonas españolas hacia finales de este siglo.

Retomando la pregunta que nos hacíamos al principio, podemos afirmar que sí puede haber desertificación en España pese al aumento de su superficie forestal. Urge, pues, que acometamos cambios importantes en nuestro sistema productivo y la relación que mantenemos con nuestro entorno, así como que pongamos en marcha medidas encaminadas a reducir la magnitud del cambio climático y mitigar sus efectos.

FERNANDO T. MAESTRE

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Gastrocultura Mediterránea.



La revolución de los gelificantes

De la crisis de las vacas locas a las aplicaciones sociales de la gastronomía molecular



BACALAO GELIFICADO con salsa de azafrán, una de las recetas que permite mejorar la dieta de las personas con disfagia.

Es común en varias tradiciones culinarias emplear la sustancia gelificada que se obtiene al hervir restos de animales o algas (las proteínas liberadas forman redes tridimensionales).

En las cocinas y pastelerías occidentales, hasta hace bien poco, el único gelificante utilizado era la llamada cola de pescado, una proteína de origen animal. Si bien inicialmente se obtenía del pescado (de ahí su nombre), en la actualidad suele extraerse de restos de cerdo o vaca, pues el procedimiento es más sencillo y, por tanto, barato. Su utilización en la alta gastronomía, por Antonin Carême a finales del siglo XVIII, fue un gran éxito y se extendió rápidamente a la población. Llegó incluso hasta los ejércitos de Napoleón. En el lado asiático, a finales del siglo XVII las gelificaciones a base de algas se volvieron muy populares gracias a que el japonés Minoya Tarozaemon observó que en las sopas con algas rojas se formaban unas estructuras gelificadas que podían consumirse a diversas temperaturas.

Hasta finales del siglo XX, el panorama culinario de los gelificantes continuó mas o menos igual. Pero entonces se produjeron diversos acontecimientos que propiciaron un cambio. Uno de ellos fue la crisis de las vacas locas. El episodio obligó a sustituir la gelatina procedente de la vaca, que pasó a tener solo la alternativa del cerdo y obligó a repensar numerosos productos (sobre todo dulces) para poder venderlos en comunidades que no consumían cerdo. Al propio tiempo, creció la demanda de nuevos gelificantes para mercados emergentes (vegetarianos, veganos, halal y *kosher*).

Otro factor de suma importancia para comprender la evolución del mercado de los gelificantes es el protagonismo que estos han tenido en la revolución culinaria de las texturas. Ya en 1998, El Bulli introdujo el concepto de «gelatina caliente». Mediante la aplicación de agar agar a modo de gelificante presentó en su carta platos como una gelatina caliente de manzana y un helado de roquefort. Y no solo eso. También aplicó los nuevos gelificantes a la elaboración de «pastas sin harina»: solo era cuestión de gelificar el líquido escogido y cortarlo en forma de tallarines, raviolis, etcétera. A través de la creatividad culinaria de Ferran Adrià, las ideas de Tarozaemon llegaron a la cocina occidental.

En Inglaterra, Heston Blumental aplicó en su restaurante Fat Duck nuevos gelificantes; en particular, la goma gellan para crear elaboraciones como su famoso *Té caliente y frío* de 2005. En Nueva York, Wylie Dufresne apostó en su restaurante WD-50 por nuevos gelificantes como la metilcelulosa, que utilizaba para la elaboración de fideos de guisantes y parmesano en un consomé de azafrán (se forman en el instante en que el gelificante se introduce en el líquido caliente).

Pero lo más sorprendente fue la aplicación —de nuevo en El Bulli— del gelificante alginato que dio lugar a la famosa técnica culinaria de la esferificación. El alginato gelifica en presencia de calcio y produce elaboraciones líquidas en el interior y gelificadas en el exterior [*véase* «La esferificación», por Pere Castells; Investigación y Ciencia, abril de 2008]. El *Caviar de melón* y el *Ravioli de guisantes* dieron rápidamente la vuelta al mundo en 2003.

También los carragenatos se han instaurado en el campo gastronómico. El carragenato kappa presenta una gelificación muy firme y se forma muy rápidamente. De inmediato se le asoció una propiedad: la capacidad de napar, es decir, de cubrir un producto sólido con una capa exterior. Varios restaurantes comenzaron a ofrecer elaboraciones como tomates «cherry» recubiertos de pesto con carragenato kappa. También el carragenato iota se ha hecho un lugar debido a que permite obtener elaboraciones únicas como el flan de aceite de oliva propuesto por restaurantes vinculados al aceite como Les Moles, al sur de Tarragona.

Un capítulo especial de esta historia corresponde a las pectinas. Ya se utilizaban en pastelería, pero la revolución culinaria hizo que se desarrollaran pectinas para aplicaciones concretas como la LM Nappage, que permite obtener una capa superficial en pasteles y admite la congelación.

Pero la dimensión más importante de esta revolución gastronómica ha sido la social. Rebecca Reilly, Farrell Frankel y Sari Edelstein, del Departameto de Nutrición del Colegio Universitario Simmons, publicaron en 2013 en *Journal of Nutritional Health and Food Science* un artículo que resaltaba las virtudes de aplicar la gastronomía molecular a las dietas para disfágicos; al ofrecer elaboraciones más variadas y sabrosas, hace más placenteras las comidas de estos pacientes. Asimismo, estos investigadores proponían que estas recetas se extendieran a hogares de ancianos, hospitales y otras comunidades que requirieran dietas blandas [*véase* «Texturas blandas», por Pere Castells; Investigación y Ciencia, septiembre de 2013]. Con una población cada vez mas envejecida, sería una gran noticia que estas propuestas pronto fueran una realidad.



EL FUTURO DE LA MEDICINA 2018

ENFERMEDADES EMERGENTES EN UN MUNDO CAMBIANTE

«En un mundo sin cambios no se observan muchas enfermedades emergentes», afirma el epidemiólogo William Karesh en el artículo de Lois Parshley que abre este informe especial. No hay duda de que nuestro mundo está transformándose a gran velocidad. El cambio climático, la urbanización incontrolada y el enorme flujo de personas y bienes que caracteriza a las sociedades modernas están creando condiciones que favorecen la aparición y la rápida propagación de enfermedades infecciosas. Los distintos artículos de este informe especial analizan la situación y argumentan a favor de una colaboración entre epidemiólogos, climatólogos, médicos y expertos en sistemas complejos para atajar un problema de salud con profundas raíces sociales.

ILUSTRACIONES DE HANNA BARCZUK



SALUD GLOBAL

EPIDEMIAS QUE VARÍAN CON EL CLIMA

El cambio climático acelera la propagación de las enfermedades y dificulta sobremanera la predicción de los brotes

Lois Parshley

Fotografías de Sean McDermott

EN SUDÁFRICA se intenta averiguar dónde se esconde el virus de la fiebre del Valle del Rift, entre una y otra epidemia.


EL
FUTURO
DE LA
MEDICINA
2018

La granja de Kobus Steenkamp se extiende a lo largo de un camino en la planicie central de Sudáfrica, donde el cielo lo empequeñece todo. Una mañana de 2010, pasada la temporada de lluvias, descubrió que algo extraño les había sucedido a sus ovejas. «Tenían el lomo ensangrentado», recuerda. Todas las hembras preñadas habían abortado.

Era la pesadilla de todo granjero: su rebaño había contraído la fiebre del Valle del Rift, cuya causa es un virus transmitido por mosquitos, que provoca abortos y muertes en el ganado y la fauna, además de poderse contagiar a los humanos. En unos días, docenas de personas se habían infectado. La mayoría solo manifestó síntomas seudogripales, pero en algunos casos la infección derivó en una grave fiebre hemorrágica, semejante al ébola.

La situación se repitió en toda la región. La supervivencia de los animales adultos rondó apenas el 10 por ciento y casi todas las ovejas preñadas abortaron. Los corderos y los becerros muertos permanecieron abandonados en los campos hasta que el equipo veterinario del estado procedió a su recogida e incineración. Hasta que no se declaró controlada, la epidemia se cobró la vida de 9000 animales y 25 personas. Los países vecinos, como Zimbabue y Namibia, prohibieron la importación de carne sudafricana, con cuantiosas pérdidas para el sector ganadero.

Desde que se descubriera en 1931 en el Valle del Rift en Kenia, los brotes epidémicos del virus se habían limitado al sur y al este del continente. Pero en 1977 avanzó hacia el norte, a raíz del aumento del comercio por el Nilo, y, en palabras de la Organización Mundial de la Salud (OMS) causó en Egipto una «epidemia masiva». Más tarde, en septiembre de 2000, saltó a la península arábiga y llegó hasta Arabia Saudita y Yemen, lo que despertó el temor de que Europa y Norteamérica fueran las siguientes. El miedo a que pudiera propagarse en pocos años por ambos continentes no es exagerado. El virus del Rift se transmite a través de una variedad de hospedadores y vectores mayor que la del virus del oeste del Nilo, que llegó a Nueva York en 1999 y se diseminó por todo el país en menos de seis años. El Departamento de Agricultura de EE.UU. tomó buena nota y lo calificó como el tercer patógeno animal más peligroso, solo por detrás de la gripe aviar y la fiebre aftosa. Pero a las autoridades sanitarias no solo les preocupa el impacto en la fauna y la ganadería. Las zoonosis (enfermedades infecciosas que se originan en los animales y se contagian a las personas) entrañan el mayor riesgo de epidemia y pandemia. Son culpables de algunas de las peores plagas de la historia, como la peste bubónica o el ébola.

El miedo a que la fiebre del Rift adquiera dimensiones de pandemia pone de relieve que los expertos en salud pública aún no saben predecir con fiabilidad los brotes epidémicos, de consecuencias devastadoras para la sanidad, la economía y la estabilidad política. Entretanto, crece la amenaza de las zoonosis emergentes, a menudo de improviso. Apenas comenzamos a entender qué vínculos unen las epidemias con las condiciones meteorológicas cambiantes, seña de identidad del cambio climático. Y cuanto más se sabe, más se complica el cuadro. La temperatura terrestre está aumentando con más rapidez de lo previsto y, como resultado, también se acelera la modificación de las áreas de distribución de la fauna, de los virus y, cada vez más, de los pobladores humanos. Estas relaciones complejas son hoy más inestables que nunca, por lo que, en un reciente artículo en *The Lancet*, se concluye que el cambio climático es «la mayor amenaza del siglo xxi» y, en otro artículo de la revista, se augura que «podría arruinar los progresos de la segunda mitad del siglo en el campo del desarrollo y de la salud mundial».

El calentamiento global y las condiciones meteorológicas extremas ya repercuten drásticamente en la sanidad pública. La intensificación de las inundaciones, las sequías y las tormentas no solo altera el paisaje, sino que modifica el modo como las personas explotan la tierra y, en último término, donde pueden vivir [*véase* «Víctimas del cambio climático» por Alex De Sherbinin et al.; Investigación y Ciencia, marzo de 2011]. Mientras los climatólogos se afanan en corregir las variaciones, para que, por ejemplo, las poblaciones costeras se puedan adaptar al ascenso del mar, los epidemiólogos comienzan a tomar conciencia de la urgencia de concebir modelos predictivos de las epidemias que incorporen las condiciones climáticas nuevas e inminentes. En un mundo cada vez más globalizado, la búsqueda ya no es solo cuestión de equidad entre los países en desarrollo y avanzados; puede ser decisiva para evitar pandemias sin precedentes.



Lois Parshley, periodista distinguida con varios premios, obtuvo la beca Knight-Wallace de periodismo para el período 2017-2018 y ha sido redactora de *Popular Science* y *Foreign Policy*.

EN SÍNTESIS

Aún no sabemos predecir cómo la enfermedad deviene en epidemia. Pero una nueva estrategia que incorpora modelos climáticos podría dar respuestas importantes.

Un singular proyecto multidisciplinar, que tiene como escenario Sudáfrica, estudia la fiebre del Rift para conocer la dinámica inestable que vincula el clima, el uso del suelo, las personas y los animales.

El cambio climático complica y acelera la propagación de las enfermedades, con consecuencias imprevisibles.

UNA ESTRATEGIA INTERCONECTADA

Para llegar a la granja de Steenkamp, el biólogo Ettienne Theron debe conducir varias horas hacia un horizonte inabarcable. Cargado con neveras de mano llenas de sangre, circula dando tumbos por una carretera maltrecha, flanqueada por praderas. En estas llanuras se desataron las últimas epidemias de fiebre del Rift en Sudáfrica. Y es en esa región, que supera los 32.000 kilómetros cuadrados, donde Theron y docenas de otros investigadores recaban datos para un proyecto dirigido por EcoHealth Alliance, una ONG internacional dedicada a la prevención de las pandemias. El reto estriba en averiguar cómo intervenir antes de que los microbios infecten a la población. En un vídeo de 2015, Peter Daszak, presidente de la ONG, afirma que, una vez declarada la pandemia, «lo único que se puede hacer es apagar el fuego». El objetivo de este proyecto multidisciplinar de cinco años es examinar, por primera vez y de un modo preciso, cómo influyen las condiciones climáticas en la fiebre del Rift en el sur de África. Aspiran a elaborar una base de datos que permita predecir las epidemias, un paso previo para el diseño de modelos destinados a otros virus. La financiación corre a cargo del Departamento de Defensa de EE.UU. Durante la guerra fría, este país y la URSS adoptaron el virus del Rift como arma bioló-



ZIKHONA GQALAQHA, estudiante de la Universidad del Estado Libre, recoge datos sobre la humedad del suelo en una de las 22 estaciones meteorológicas que forman parte del proyecto de EcoHealth Alliance sobre la fiebre del Valle del Rift.

gica, en forma de aerosol. Pero el bioterrorismo solo es una de las preocupaciones; impedir que las enfermedades desembarquen en el país —y saber cómo reaccionar si lo hicieran— es, cada vez más, un asunto de seguridad nacional.

Al fin, Theron llega a una entrada sin señalizar y los miembros del equipo se apean del camión y se calzan botas para caminar por el fango. Por medio de una distribución aleatoria de puntos de GPS, han llegado a un acuerdo con 361 granjas, como la de Steenkamp, donde, durante dos años seguidos, obtendrán muestras de sangre de los rebaños y del personal. Las analizarán en busca de anticuerpos contra el virus del Rift para averiguar así dónde permanece oculto cuando no se comunican casos de infección. El propio Steenkamp la padeció durante una epidemia en los setenta y, según la OMS, cada año 10.000 personas contraen el virus, cifra que probablemente irá en alza. En un estudio publicado en *Emerging Microbes & Infections* en 2016, se afirma que la «naturaleza explosiva» de las últimas epidemias delata que el virus ha mutado y adquirido mayor virulencia y capacidad infecciosa. A medida que se desplace a otros lugares, seguirá evolucionando y podría volverse más peligroso aún.

Mientras los peones acorralan a las ovejas en un rincón de un corral herrumbroso, la coordinadora de campo, Claudia Cordel, desembala y dispone sobre una mesa plegable una provisión de viales, hojas de datos, guantes de goma y una caja de jeringas. Un peón sujeta a una, que bala y forcejea mientras Cordel le extrae sangre del cuello. En Sudáfrica, se piensa que el mosquito *Aedes mcintoshi* es el principal transmisor del virus. La hembra pasa el patógeno a su descendencia y los huevos resisten años de sequía, un fenómeno corriente en la región. Cuando nace la nueva generación de mosquitos infectados, transmite el virus al ganado y a la fauna. El patógeno se multiplica en su cuerpo y, cuando mosquitos de mayor recorrido, como *Culex* y *Anopheles*, pican a los animales infectados, el brote inicial deviene en epidemia por la rápida propagación.

En otro corral, la coordinadora limpia con un trapo el ano de una vaca antes de pinchar la vena de su cola. Dolorida, muge y le lanza un chorro verdoso a la cara. Los elementos básicos de la transmisión del virus se conocen, pero confiesa que «no tenemos ni idea del impacto que la fauna ejerce sobre los habitantes y el ganado, o viceversa», lo que se suma al práctico desconocimiento sobre los ciclos de retroalimentación. Por ello, el equipo de EcoHealth pretende observar metódicamente la interacción entre el clima, la vegetación, los insectos, la fauna y la gente. En 22 estaciones de investigación dispersas por las provincias de Estado Libre y Cabo del Norte se atrapan mosquitos en busca del virus, se determina la composición del suelo y de la

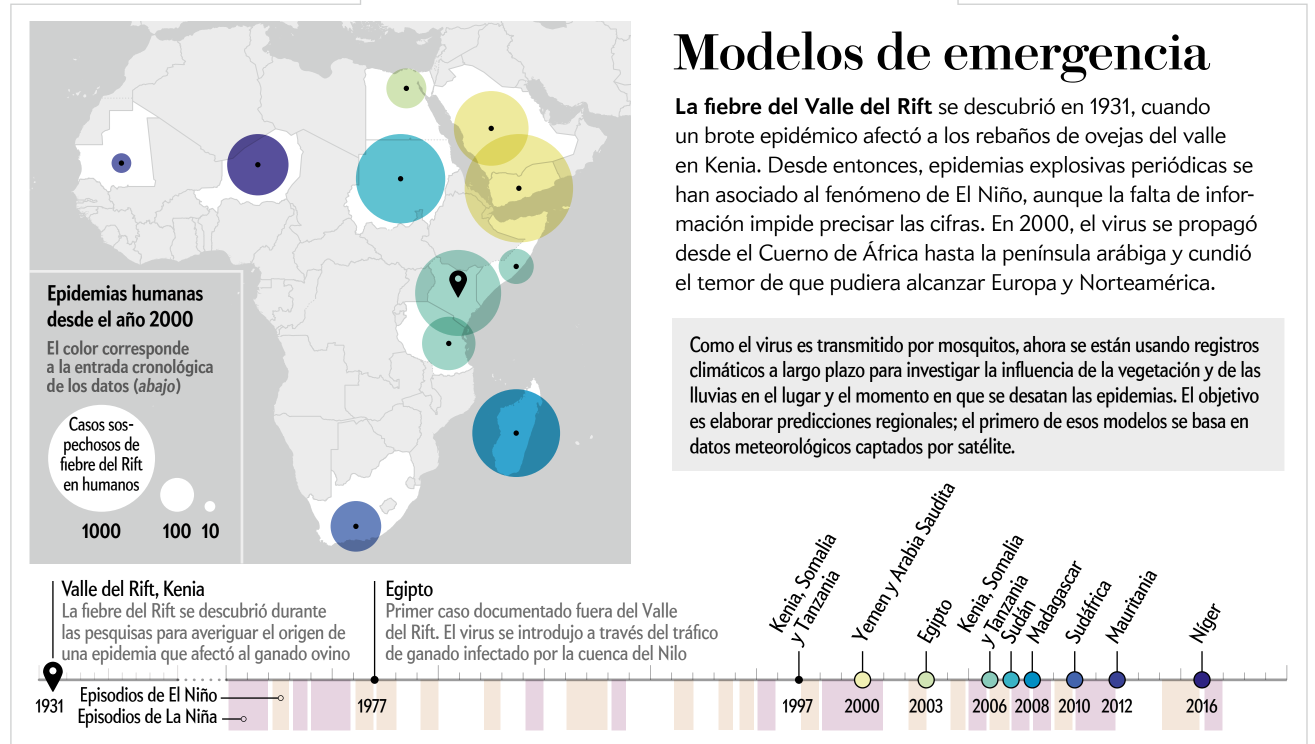
Continúa en la página 64

CRONOLOGÍA Y GEOGRAFÍA DE LOS BROTES

Modelos de emergencia

La fiebre del Valle del Rift se descubrió en 1931, cuando un brote epidémico afectó a los rebaños de ovejas del valle en Kenia. Desde entonces, epidemias explosivas periódicas se han asociado al fenómeno de El Niño, aunque la falta de información impide precisar las cifras. En 2000, el virus se propagó desde el Cuerno de África hasta la península arábiga y cundió el temor de que pudiera alcanzar Europa y Norteamérica.

Como el virus es transmitido por mosquitos, ahora se están usando registros climáticos a largo plazo para investigar la influencia de la vegetación y de las lluvias en el lugar y el momento en que se desatan las epidemias. El objetivo es elaborar predicciones regionales; el primero de esos modelos se basa en datos meteorológicos captados por satélite.



FUENTES: ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD Y CENTROS PARA EL CONTROL Y LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES DE EE.UU. (*datos de epidemias*); SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL DE EE.UU. (*datos de El Niño y La Niña*); TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráficos*)

Las infecciones en cifras

Las epidemias de enfermedades infecciosas están al alza en todo el mundo, si bien su mortalidad disminuye. A continuación se presentan algunos datos que ejemplifican estas tendencias. En Estados Unidos, el número de personas con ciertas infecciones ha aumentado en pocos años **A**. En todo el mundo, la mortalidad debida a muchas infecciones ha disminuido a largo plazo, aunque esta tendencia varía en función del nivel económico **B**. En conjunto, si se tienen en cuenta tanto el número de personas infectadas como la mortalidad, las epidemias son más frecuentes, y sus causas, más variadas **C**.

GLOSARIO

Enfermedad infecciosa: Toda enfermedad causada por microorganismos, ya sean bacterias, virus, parásitos u hongos, que se puede propagar de una persona a otra o de un animal a una persona.

Endemia: Nivel basal de una enfermedad, presente de forma habitual en una comunidad.

Epidemia o brote epidémico: Aumento, a menudo súbito, del número de casos de una enfermedad por encima del nivel normal en una región. En ocasiones se refiere a un incremento en una zona geográfica más pequeña.

Pandemia: Epidemia que se ha extendido a varios países o continentes y que afecta, por lo general, a un gran número de personas.

Zoonosis: Enfermedad infecciosa que se origina en animales vertebrados y se propaga a las personas. La transmisión puede ser por contacto directo o desde los animales hacia los humanos a través de un vector; por ejemplo, por la picadura de un insecto.

Formas de cuantificar una enfermedad

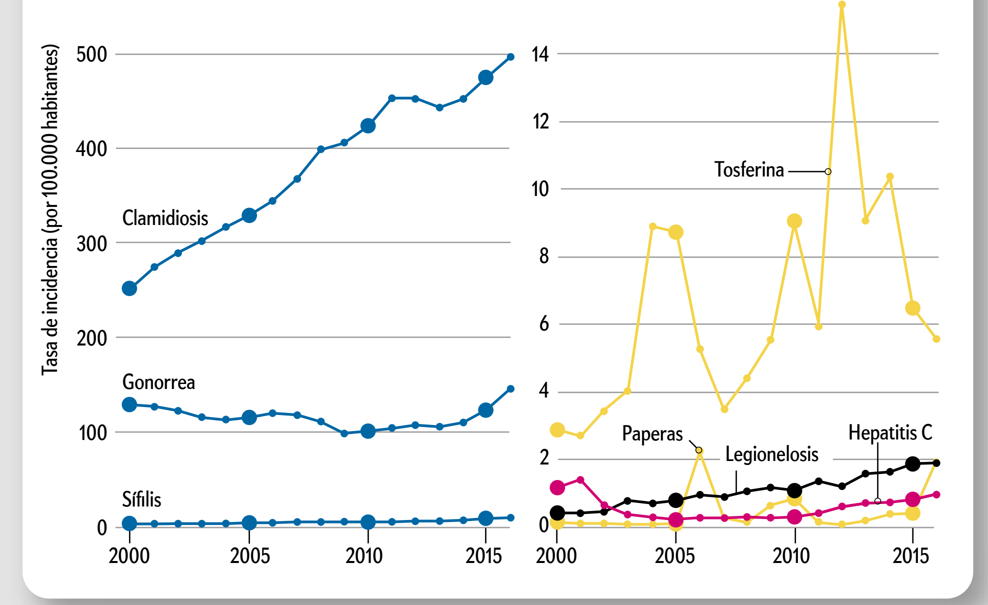
Mortalidad: Número de muertes causadas por una enfermedad en una población en un tiempo dado.

Incidencia: Número de casos nuevos de una enfermedad en una población en un tiempo dado.

FUENTES: AMANDA HOBBS (*estudio*); «SUMMARY OF NOTIFIABLE INFECTIOUS DISEASES AND CONDITIONS—UNITED STATES», REPORTS FOR 2014 AND 2015 EN *MORBIDITY AND MORTALITY WEEKLY REPORT;* 2016 ANNUAL TABLES OF INFECTIOUS DISEASE DATA, NATIONAL NOTIFIABLE DISEASES SURVEILLANCE SYSTEM, CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, 2017 WWW.CDC.GOV/NNDSS/INFECTIOUS-TABLES.HTML (*datos sobre legionelosis, paperas, tosferina y hepatitis C*); *SEXUALLY TRANSMITTED DISEASE SURVEILLANCE 2016*, CDC, SEPTIEMBRE DE 2017 (*datos sobre enfermedades de transmisión sexual*); *GLOBAL HEALTH ESTIMATES 2015: DEATHS BY CAUSE, AGE, SEX, BY COUNTRY AND BY REGION, 2000-2015*, WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2016 (*datos sobre mortalidad*); «GLOBAL RISE IN HUMAN INFECTIOUS DISEASE OUTBREAKS», KATHERINE F. SMITH ET AL. EN *JOURNAL OF THE ROYAL SOCIETY INTERFACE*, VOL. 11, N.º 101; DICIEMBRE DE 2014 (*datos sobre epidemias*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficas*)

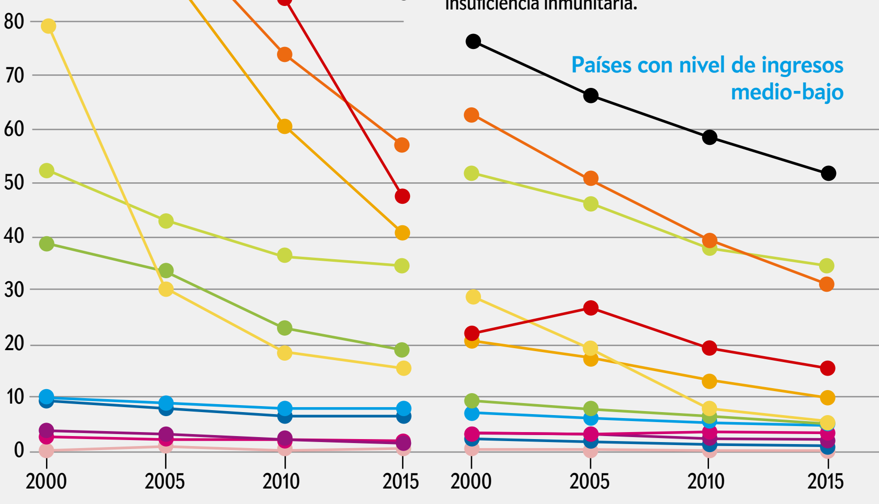
A Aumento de las infecciones en Estados Unidos

Históricamente EE.UU. ha controlado bien las infecciones. Sin embargo, en fechas recientes ha aumentado el número de nuevos casos de algunas de ellas, circunstancia que se atribuye al aumento de la pobreza y a unas poblaciones cada vez más vulnerables. Según datos de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU., en los últimos tiempos se han diagnosticado más casos de enfermedades de transmisión sexual; la clamidiosis, la gonorrea y la sífilis se han consolidado. También han aumentado la legionelosis y la hepatitis C. Algunas enfermedades infantiles, como la tosferina, que se puede combatir con la vacunación, experimentan aumentos y descensos.



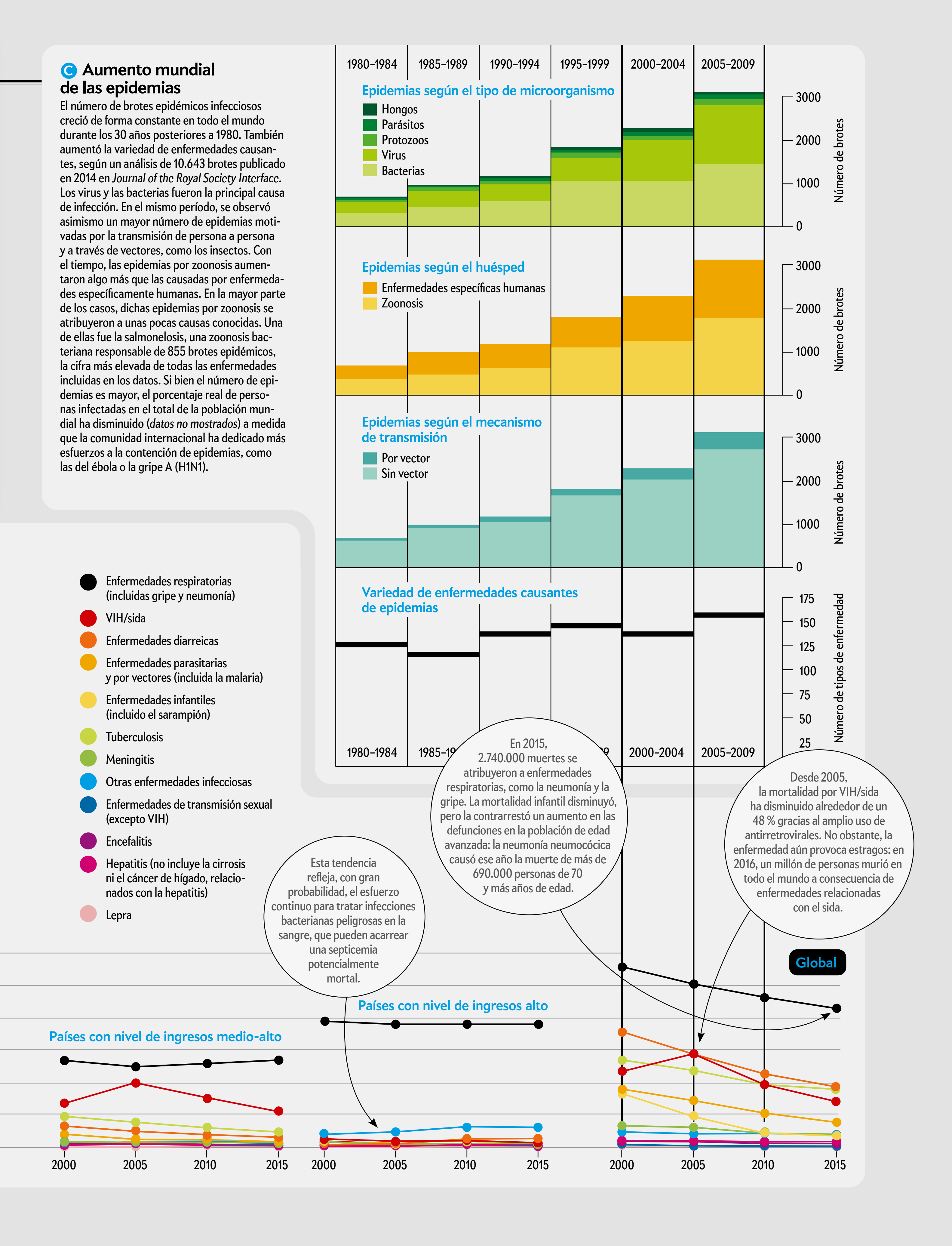
B La mortalidad mundial disminuye, pero varía en función del tipo de economía

Al dividir los países en función del tipo de economía (según la definición del Banco Mundial), se aprecian diferencias en las tasas de mortalidad. Según la OMS, durante los 15 primeros años de este siglo la mortalidad en países con ingresos bajos y medio-bajos, como Haití o la India, cayó bruscamente desde unos valores inicialmente altos. Ello fue debido en parte a una mayor disponibilidad de asistencia sanitaria y medicamentos. La mortalidad por VIH/sida disminuyó tras 2005 gracias a una iniciativa que proporcionó tratamiento, incluidos antirretrovirales, a los países más pobres. Las naciones de ingresos medio-altos y altos, como China o Alemania, partían de una asistencia más avanzada, por lo que no experimentaron una disminución brusca de la mortalidad. Aún así, los países desarrollados han pasado por dificultades para controlar enfermedades respiratorias, como la neumonía, que afecta a ancianos y a personas con insuficiencia inmunitaria.



C Aumento mundial de las epidemias

El número de brotes epidémicos infecciosos creció de forma constante en todo el mundo durante los 30 años posteriores a 1980. También aumentó la variedad de enfermedades causantes, según un análisis de 10.643 brotes publicado en 2014 en *Journal of the Royal Society Interface*. Los virus y las bacterias fueron la principal causa de infección. En el mismo período, se observó asimismo un mayor número de epidemias motivadas por la transmisión de persona a persona y a través de vectores, como los insectos. Con el tiempo, las epidemias por zoonosis aumentaron algo más que las causadas por enfermedades específicamente humanas. En la mayor parte de los casos, dichas epidemias por zoonosis se atribuyeron a unas pocas causas conocidas. Una de ellas fue la salmonelosis, una zoonosis bacteriana responsable de 855 brotes epidémicos, la cifra más elevada de todas las enfermedades incluidas en los datos. Si bien el número de epidemias es mayor, el porcentaje real de personas infectadas en el total de la población mundial ha disminuido (*datos no mostrados*) a medida que la comunidad internacional ha dedicado más esfuerzos a la contención de epidemias, como las del ébola o la gripe A (H1N1).



Viene de la página 61

vegetación y se levantan pequeñas estaciones meteorológicas para estudiar el tiempo junto con los datos de satélite. Este enfoque integral, que exige docenas de expertos en epidemiología, ecología, meteorología, veterinaria y entomología, es caro y extraordinario. Pero puede permitir que en el futuro sepamos cómo brotan y se propagan las enfermedades infecciosas.

Melinda Rostal, investigadora del proyecto, afirma: «Es lógico que la salud de la población animal esté ligada a la de la población humana». A menudo, los animales constituyen uno de los primeros signos de alarma ante brotes epidémicos; el año pasado, en Brasil, casi todos los monos de ciertas zonas murieron ocho meses antes de que se declarara una epidemia de fiebre amarilla. Pero, hasta hace poco, la comunidad sanitaria mundial no mostraba gran interés en el estudio organizado de las interacciones entre las personas, los animales y el ambiente. Esa estrategia, definida por primera vez en 1964 por el epidemiólogo Calvin Schwabe y hoy llamada «Una sola salud», es una visión cada vez más extendida en epidemiología. Ya Hipócrates entendió que el ambiente —incluidas las condiciones meteorológicas— influye en la enfermedad, pero la investigación multidisciplinar enfocada a desentrañar los sistemas complejos es relativamente nueva. Los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU. (CDC) no abrieron un despacho de «Una sola salud» hasta 2009, cuando las autoridades reconocieron que las interacciones ambientales cambiantes «habían propiciado la aparición y el resurgimiento de numerosas enfermedades». De entrada, la investigación de «Una sola salud» es cara, pero a la larga será rentable: enviar equipos de investigadores en lugar de expertos por separado ha reducido en un 35 por ciento los costes de desplazamiento del proyecto de EcoHealth sobre la fiebre del Rift.

Que no se haya optado antes por ese tipo de coordinación se debe, en parte, a que la comunidad sanitaria mundial aún se está poniendo al día de las enfermedades emergentes. Pensemos en el zika, descubierto en 1947 en Uganda: permaneció ignorado durante décadas hasta que, en 2015, empezó a extenderse con rapidez por América. Cuando una enfermedad así surge por primera vez, suele pasar inadvertida porque afecta a los más pobres, lo que significa que, en general, no es rentable para el desarrollo farmacéutico. El resultado es que las enfermedades tropicales desatendidas ya han causado, según los CDC, 57 millones de años de vida perdidos de forma prematura. De ahí la relevancia de uno de los proyectos de mayor envergadura emprendidos en el marco de «Una sola salud»: el estudio de EcoHealth sobre el virus del Rift. ¿Podrán colmar esa laguna los grandes proyectos de investigación multidisciplinares?

Cuando a la caída del sol la hierba se torna dorada, Cordel y Theron dan por acabada su visita a la granja revisando una de las estaciones meteorológicas, delatada por una hélice que se divisa sobre la alambrada. Los datos de satélite de la NASA indican que el tiempo cambiará en la región, lo que modificará el riesgo de infecciones, como la fiebre del Rift. Su transmisión es compleja, pero conocer las implicaciones del cambio climático será un factor esencial para su control en el futuro.

PREVISIÓN METEOROLÓGICA A PEQUEÑA ESCALA

En los largos trayectos que separan las estaciones dispersas por los campos, contemplo los girasoles agostados bajo el cielo inclemente. Sudáfrica soporta años de sequía, y la tierra arcillosa luce

Un sinfín de problemas

El programa que persigue detener la llegada de enfermedades mortales a Estados Unidos mediante la ayuda a otros países se enfrenta a importantes recortes

Thomas Inglesby

Cuando se declaró la epidemia de ébola en Liberia, Sierra Leona y Guinea, entre 2014 y 2016, la respuesta fue amplia, porque los países afectados carecían de los sistemas sanitarios necesarios para detener el virus. Los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU. (CDC), junto con otras instituciones internacionales y nacionales, suministraron el material y la experiencia para acabar con la epidemia. Para que tales desastres no se repitieran, el Gobierno estadounidense reforzó su programa contra las enfermedades infecciosas como parte de una nueva iniciativa internacional: la Agenda de Seguridad Sanitaria Mundial (GHSA). El objetivo de muchas campañas internacionales es mejorar la respuesta ante una enfermedad concreta, pero la GHSA crea una infraestructura para controlar multitud de patógenos. Y aunque se centra en los países en desarrollo, la iniciativa favorece, de forma directa, a EE.UU., porque, si no se controlan, enfermedades como el ébola llegarán tarde o temprano a sus costas. Esta labor, organizada en gran parte por los CDC y la Agencia para el Desarrollo Internacional del mismo país, ha dado como fruto cientos de intervenciones que refuerzan la autonomía de los países para detectar, prevenir y tratar las infecciones peligrosas.

Pese al éxito, el presupuesto presentado el pasado invierno por el presidente Donald Trump ha recortado los fondos para la GHSA a 59 millones de dólares para el próximo año fiscal. Esto supone una reducción importante respecto a los 1000 millones que el Congreso aprobó para el sexenio de 2014-2019. Los CDC tendrán que cancelar numerosos programas de seguridad sanitaria en el extranjero si el Congreso —que en último término fija el nivel de gasto— no aumenta la asignación.

¿Qué perderíamos? Los CDC han impartido formación en laboratorios de otros países para que detecten las nuevas cepas del virus de la gripe, allí donde aparece antes de llegar a EE.UU. En Uganda han reforzado la dotación de los laboratorios y han contribuido a crear un centro coordinador de emergencias, así como a capacitar a los epidemiólogos de campo. Fruto de ello, hace poco se detectó en tres días una epidemia de fiebre amarilla, cuando en 2010 se tardaron cuarenta en reconocer otra similar. En India, el apoyo prestado ayudó a que hospitales remotos empezaran a diagnosticar fiebres y enfermedades misteriosas. En Sierra Leona, permitió descubrir 4000 casos de sarampión, no detectados antes, lo que condujo a la vacunación de más de 2,8 millones de niños. Y en zonas del mundo donde el carbunco mata todavía a personas y animales, han brindado ayuda técnica para reducir los casos y paliar sus efectos. Todo eso es exactamente lo que el mundo precisará para detectar y combatir la próxima epidemia de una enfermedad infecciosa emergente, que podría ser desconocida para la humanidad. La aparición del síndrome respiratorio agudo grave (SARS), del H1N1 en 2009,



HANNA BARCZYK

del síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS), de la gripe aviar y del zika subrayan la urgencia.

Otros intentos por hacer frente a esa necesidad han fracasado. En 2005 se suscribieron las Regulaciones Sanitarias Internacionales, un acuerdo vinculante que pretendía dotar de los medios básicos para contener las amenazas para la salud pública. Pero, en 2014, menos de un tercio de los países firmantes había cumplido los compromisos de personal y recursos materiales. Por esa razón se fundó la GHSA.

En contraste con la iniciativa anterior, más de 60 países se han adherido a esta. Tras la firma de EE.UU. como promotor, otros países y las principales organizaciones internacionales lo han secundado enviando fondos y ayuda material. Cuanto más colaboran los miembros en la iniciativa, menos necesitan gastar para sí mismos.

Si EE.UU. recorta su cuota colaborativa, los países más vulnerables a las nuevas epidemias tendrán más dificultades, si cabe, para crear laboratorios de diagnóstico que alerten a tiempo de la diseminación de las infecciones, y caerán en vano los esfuerzos para formar y equipar a los científicos y a las autoridades sanitarias locales. Los recortes minarán la cooperación internacional que generan los programas en que la ciencia estadounidense revierte en interés del mundo, y que, al mismo tiempo, protegen a su ciudadanía. La GHSA constituye la primera línea de defensa regional, en un mundo en el que la próxima enfermedad mortal acecha a un corto vuelo en avión.

***Thomas Inglesby,** médico especialista en infectología, dirige el Centro de Seguridad Sanitaria, de la Escuela Bloomberg de Salud Pública de la Universidad Johns Hopkins.*

resquebrajada. La sequía es un elemento clásico del fenómeno de El Niño y, cuando al fin llega La Niña y cierra el ciclo, la región sufre lluvias intensas. Si bien los ciclos son normales, el cambio climático los intensifica y se vuelven alternativamente más secos y más húmedos, como explica Assaf Anyamba, del Centro de Viajes Espaciales Goddard de la NASA. (En marzo Sudáfrica declaró el «estado de calamidad nacional» por la sequía pertinaz. En Ciudad del Cabo, sometida a restricciones de agua, es la peor en 400 años.) Cuando las condiciones se extreman, las tormentas propias de ese régimen de lluvias —conocido como El Niño u Oscilación del Sur— y la vegetación que brota tras los chubascos hacen prever la aparición de nubes de mosquitos infectados por el virus del Rift. De hecho, combinando la información captada por satélite con los datos meteorológicos locales, Anyamba predijo la epidemia de 2006-2007 en África Oriental. «Por lo que sé, este es el único sistema existente para una enfermedad», añade.

Anyamba trasladó ese modelo al sur de África y a la península arábiga. Si pudiera aplicar los instrumentos que usó en África Oriental para predecir las epidemias de la fiebre del Rift en otros lugares, tal vez podría extender el modelo a otras enfermedades. Pero hasta ahora ha fracasado en Sudáfrica. Como climatólogo del estudio EcoHealth, intenta entender el porqué. Los datos de satélite con los que se emiten los pronósticos del tiempo a escala mundial facilitan la predicción de las variaciones en la vegetación y los insectos. El inconveniente radica en que esa visión general es bastante imprecisa. Cuando uno combina los parámetros meteorológicos con datos regionales más heterogéneos, como la vegetación, se topa con dos escalas distintas. Por ejemplo, los modelos de Anyamba, elaborados con datos del África Oriental captados por satélite, se basaban en un índice de vegetación que no reflejaba las especies propias del sur del continente. Otros factores que influyen en la enfermedad, como la diseminación de los vectores, pueden ser aún más fragmentarios. Muchos mosquitos viven en una superficie equivalente a la de un jardín doméstico, razón por la cual los datos captados por satélite no se ajustan a la escala a la que los microbios interactúan con sus huéspedes. Hace mucho tiempo que el clima se vincula con la enfermedad —pensemos en el término «estación de la gripe»—, pero es ese grado de especificidad lo que dificulta la predicción de las epidemias. Los modelos universales no funcionan.

Anyamba recurre ahora a la información que el equipo de EcoHealth recaba sobre los mosquitos y la vegetación de Sudáfrica para elaborar un modelo más acorde con la región. El cambio climático puede hacer que, con el tiempo, la provincia del Estado Libre sea más árida, lo que ayudaría a prevenir las epidemias de la fiebre del Rift. En cambio, puede que otras zonas del país se vuelvan más cálidas y húmedas, lo que favorecerá enfermedades que, como la anterior, se propagan con las inundaciones. Crear instrumentos más sensibles a escala regional ayudará a saber cómo puede variar la presión de la enfermedad a escala local y mundial.

Conseguirlo es urgente. Aunque en epidemiología raramente se obtienen conclusiones definitivas, está claro que ya andamos inmersos en una creciente variabilidad meteorológica —y, por ende, en una mayor fluctuación de las enfermedades—. La primera prueba concluyente de esa tendencia fue seguramente un estudio que vio la luz en 2002, en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. En él se examinó la prevalencia del

cólera en Bangladesh a lo largo de 70 años y se halló que el calentamiento del siglo pasado estaba influyendo en las enfermedades. El hábitat de los mosquitos y otros insectos se ha expandido debido al alza de la temperatura, por lo que nuevas poblaciones quedan expuestas a los virus y los parásitos. Estudios preliminares indican que el paludismo, por ejemplo, está en auge en el mundo. Según la OMS, un incremento de solo dos grados —un valor al que nos acercamos con rapidez— aumentará en cientos de millones el número de personas en riesgo. Por extraño que parezca, lugares donde hoy domina un clima idóneo tal vez no lo sean tanto a medida que se vuelvan más cálidos; seguramente el paludismo acabará predominando donde aún no ha llegado, como en EE.UU.

Semejante incertidumbre resulta inquietante. Tomemos como ejemplo el virus de la lengua azul, causante de una mortífera enfermedad de los rumiantes transmitida por la picadura de mosquitos del género *Culicoides*. En su origen era tropical, pero, hacia 2006, Europa occidental sufrió un calentamiento suficiente para que algunos mosquitos viajaran hacia el norte e infectaran animales. La sorpresa surgió cuando, más tarde, otro tipo de mosquito adquirió el virus de ovejas afectadas y lo llevó consigo hasta Noruega dejando un largo rastro. Según Corrie Brown, anatomopatóloga veterinaria de la Universidad de Georgia, la lengua azul es un claro ejemplo de cómo el cambio climático propicia, por primera vez, el salto de una especie a otra, lo que aumenta la imprevisibilidad en torno a la propagación de las enfermedades.

Los expertos no se ponen de acuerdo sobre la manera de gestionar tales riesgos. La Agencia para el Desarrollo Internacional de EE.UU. aboga por la búsqueda de nuevos patógenos, pero Brown opina que el mero descubrimiento de virus nuevos no es el mejor modo de aprovechar los escasos fondos de investigación. Y añade: «Entiendo que resulte productivo para los investigadores, pues publican muchos artículos», pero duda de que sirva para prevenir la enfermedad. Brown y otros propugnan una estrategia parecida a la de «Una sola salud»: opinan que el modo más eficaz de luchar contra la naturaleza aparentemente caprichosa de las enfermedades emergentes sería reforzar la infraestructura local, mediante la creación de redes de control y vigilancia o la formación del personal sanitario, entre otras medidas. «Si formamos mejor a los profesionales sanitarios de todo el mundo, estaremos mejor preparados», opina.

Los sistemas de detección local son primordiales en lugares donde los desplazados a entornos nuevos son los humanos, circunstancia que los expone a enfermedades que no han conocido. En palabras de William Karesh, epidemiólogo e investigador jefe del estudio sobre la fiebre del Rift: «En un mundo sin cambios no se observan muchas enfermedades emergentes. Es cuando los sistemas cambian que los microbios se manifiestan de nuevas maneras». Con frecuencia, las epidemias y su efecto dominó «surgen en zonas limítrofes, donde las personas viven cerca de espacios naturales», afirma Carrie La Jeunesse, que gozó de una beca de Política en Ciencia y Tecnología de la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia y que trabajó sobre el ébola. Desde 2009, la Agencia para el Desarrollo Internacional de EE.UU. ha elaborado un mapa de riesgos sobre pandemias causadas por enfermedades emergentes, muy similar a los mapas de las regiones amenazadas por el crecimiento humano. En un artículo publicado en 2012 en *The Lancet*, Karesh y otros resumieron estos hallazgos y explicaron que «es posible vincular muchas zoonosis con los cambios a gran escala en el aprovechamiento del suelo».



Sin duda, sucede así en Sudáfrica. Como afirma Alan Kemp, entomólogo de EcoHealth: «En realidad, cultivamos la tierra con arbovirus», que son transmitidos por artrópodos, como las garrapatas. «Respecto al virus del Rift, es casi seguro que, debido a la ganadería y a la importación de razas foráneas que no son resistentes, lo que cultivamos, en realidad, es literalmente la enfermedad.» Kemp suspira y dice: «Para ser sinceros, en gran parte somos culpables de nuestra ruina».

EL ESFUERZO HUMANO

Los miles de muestras de sangre que EcoHealth ha obtenido acaban bajo luz fluorescente en un laboratorio de bioseguridad de cuarto nivel, en Johannesburgo. Como en el caso del ébola, la manipulación del virus del Rift exige un confinamiento máximo, por lo que Janusz Paweska viste un traje protector presurizado mientras examina al microscopio las muestras. El estudio no acabará hasta 2019, pero el análisis ya está en marcha. «Hay quien califica la naturaleza como el bioterrorista más temible, lo cual no me gusta nada», comparte en su despacho, una vez superado el estricto proceso de descontaminación. Como director del Centro de Zoonosis y Enfermedades Parasitarias Emergentes de Sudáfrica, no se anda con rodeos: «¿Quién está creando ese ambiente propicio? No podemos culpar a la naturaleza. La urbanización descontrolada, el cambio climático o la pobreza no son la naturaleza. Es la humanidad la que prepara el caldo de cultivo para muchas de esas enfermedades».

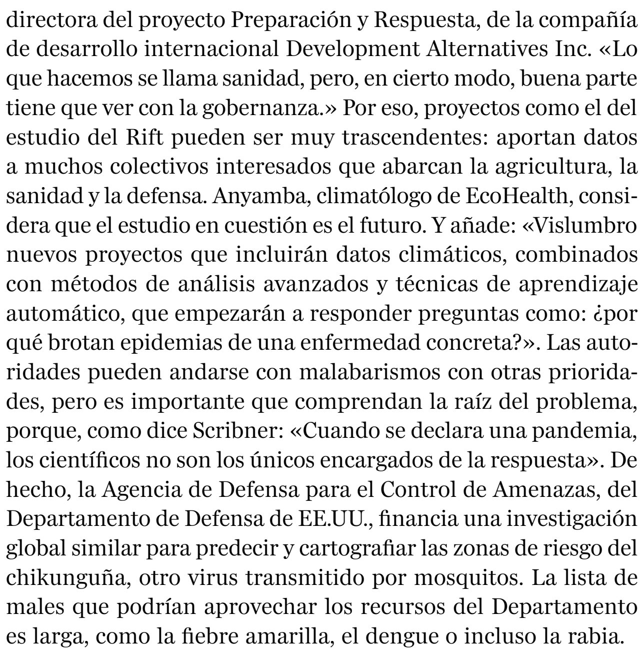
Sin duda, la pobreza ya es el mayor factor de riesgo vinculado con la enfermedad. «El principal determinante de la salud es económico», asegura Antoine Flahault, director del Instituto de Salud Global de Ginebra, por lo que el reparto desigual de la sanidad supone el problema esencial. La OMS calcula que, en los países con pocos recursos, las enfermedades de la pobreza, que a menudo se pueden prevenir o tratar (diarrea, desnutrición y parasitosis), ocasionan el 45 por ciento de las muertes. Se prevé que en pocas décadas el cambio climático condenará al menos a 122 millones de personas a la pobreza extrema, lo que obligará a muchas a dejar su hogar y provocará, asimismo, una urbanización improvisada, circunstancias que predispondrán a las enfermedades. Flahault cree que una de las mayores contribuciones del cambio climático en ese aspecto vendrá aparejada con las consecuencias de esa migración forzosa. Y añade: «Es de prever un impacto enorme sobre la salud, no solo por el efecto directo de la enfermedad, sino por los efectos económicos indirectos, que serán muy importantes».

Pero pedir a los países con pocos recursos que se preparen para una amenaza futura, con frecuencia a costa de problemas inmediatos, «supone un duro sacrificio», según Susan Scribner,





MIEMBROS DEL EQUIPO toman muestras de sangre de los peones de la granja y del ganado para detectar anticuerpos contra el virus de la fiebre del Valle del Rift. Se pretende saber dónde permanece oculto entre epidemias sucesivas.



directora del proyecto Preparación y Respuesta, de la compañía de desarrollo internacional Development Alternatives Inc. «Lo que hacemos se llama sanidad, pero, en cierto modo, buena parte tiene que ver con la gobernanza.» Por eso, proyectos como el del estudio del Rift pueden ser muy trascendentes: aportan datos a muchos colectivos interesados que abarcan la agricultura, la sanidad y la defensa. Anyamba, climatólogo de EcoHealth, considera que el estudio en cuestión es el futuro. Y añade: «Vislumbro nuevos proyectos que incluirán datos climáticos, combinados con métodos de análisis avanzados y técnicas de aprendizaje automático, que empezarán a responder preguntas como: ¿por qué brotan epidemias de una enfermedad concreta?». Las autoridades pueden andarse con malabarismos con otras prioridades, pero es importante que comprendan la raíz del problema, porque, como dice Scribner: «Cuando se declara una pandemia, los científicos no son los únicos encargados de la respuesta». De hecho, la Agencia de Defensa para el Control de Amenazas, del Departamento de Defensa de EE.UU., financia una investigación global similar para predecir y cartografiar las zonas de riesgo del chikunguña, otro virus transmitido por mosquitos. La lista de males que podrían aprovechar los recursos del Departamento es larga, como la fiebre amarilla, el dengue o incluso la rabia.

Pero la financiación —y los criterios para decidir las investigaciones que pueden optar a ella— determina qué enfermedades merecen atención. En la coyuntura política actual, los recursos a largo plazo que exigen los proyectos de logística compleja (como el del Rift) se están esfumando a marchas forzadas. Justo ahora que empezamos a valorar la urgencia de la colaboración, el Departamento de Defensa afronta un recorte drástico del presupuesto destinado a la seguridad sanitaria mundial. La financiación de la sanidad a escala planetaria es un asunto complejo en cuya gestión interviene, solo en EE.UU., multitud de organismos. En la práctica, es demasiado pronto para saber cómo afectará ese recorte a la viabilidad de cada proyecto, pero según la Fundación Brookings, podría «ser muy perjudicial para la salud mundial», al frenar el crecimiento económico y socavar la estabilidad internacional. (*Para saber más sobre las posibles consecuencias, véase el recuadro* «Un sinfín de problemas».)

En el ínterin, prosigue el arduo trabajo de campo de EcoHealth. Una mañana, el equipo se detiene en una reserva privada cercana al Parque Nacional de Mokala, para seguir la pista del kudú, un antílope. La fauna es portadora del virus del Rift y lo transmite al ganado y a las personas, pero obtener muestras no es fácil. Llega un helicóptero para prestar ayuda. Al poco, los vehículos se lanzan campo a través entre una nube de polvo hacia la manada. Por delante, los kudúes brincan y zigzaguean. Sorprende la calma que se desata cuando, desde el cielo, se consigue sedar a uno. No hay tiempo que perder. Los científicos, empuñando jeringas y viales, se abalanzan sobre él, pues despertará en minutos.

Extraída la sangre, los participantes inician la descontaminación: no puede quedar rastro de polvo en las botas, pues acabaría en la finca siguiente. Cerca, un león enjaulado yace al sol y bosteza al paso de la caravana. Antaño la sabana cubría más de la mitad del país, pero hoy gran parte ha quedado fragmentada y cercada. En pocos lugares puede la fauna vagar a sus anchas. El mundo ya ha cambiado, aunque todavía ignoremos las consecuencias. IyC

PARA SABER MÁS

Tackling climate change: The greatest opportunity for global health. Helena Wang y Richard Horton en *Lancet*, vol. 386, págs. 1798-1799, 7 de noviembre de 2015.

Rift Valley fever: An emerging mosquito-borne disease. Kenneth J. Linthicum et al. en *Annual Review of Entomology*, vol. 61, págs. 395-415, 2016.

Global hotspots and correlates of emerging zoonotic diseases. Toph Allen et al. en *Nature Communications*, vol. 8, art. 1124, 24 de octubre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los nuevos virus. Bernard Le Guenno en *IyC*, julio de 1995.

¿Cómo prever y contener epidemias como la del zika? Robert L. Dorit en *IyC*, diciembre de 2016.

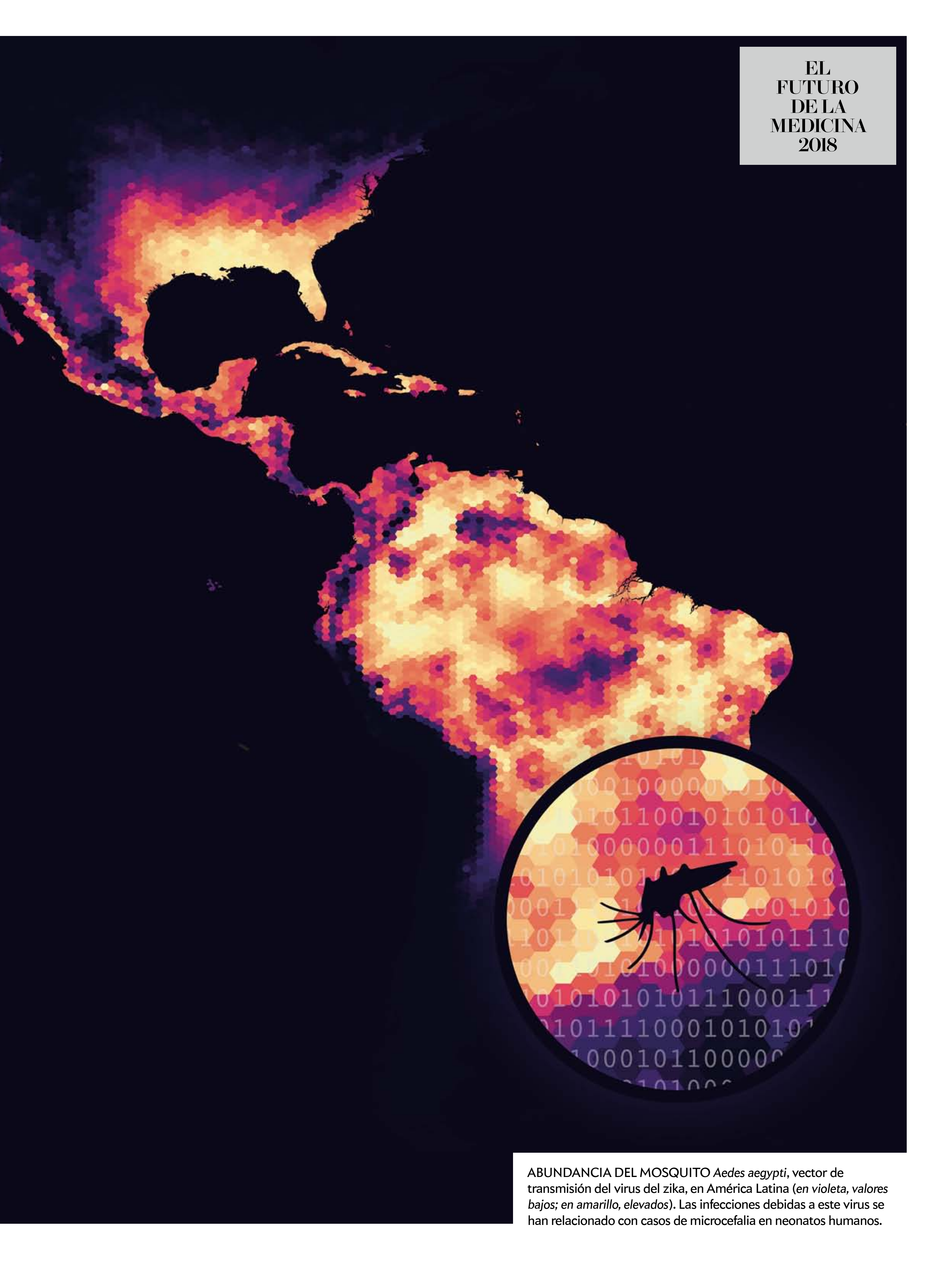
La enfermedad de Chagas, un reto global. J. Gascon, F. Torrico y M.ª Jesús Pinazo en *IyC*, febrero de 2018.

EPIDEMIOLOGÍA

PREVER LA PRÓXIMA PANDEMIA

Las simulaciones por ordenador permiten anticipar la transmisión de enfermedades por el mundo y sugieren cómo reaccionar ante crisis sanitarias globales

Alessandro Vespignani



ABUNDANCIA DEL MOSQUITO *Aedes aegypti*, vector de transmisión del virus del zika, en América Latina (*en violeta, valores bajos; en amarillo, elevados*). Las infecciones debidas a este virus se han relacionado con casos de microcefalia en neonatos humanos.



Alessandro Vespignani es profesor de la Universidad del Nordeste, en Boston, donde dirige el Instituto de Ciencia de Redes y el Laboratorio de Sistemas Biológicos y Sociotécnicos. Su actividad investigadora se ha centrado en modelizar la propagación de enfermedades infecciosas y en el estudio de las redes tecnológicas y sociales.

EN SÍNTESIS

La epidemiología computacional permite predecir la evolución, en el tiempo y en el espacio, de la transmisión de una enfermedad gracias a simulaciones informáticas.

Recientemente este sector ha experimentado un notable impulso debido a los avances en genómica, a las técnicas de rastreo de la movilidad humana y a la capacidad para analizar ingentes cantidades de datos (*big data*).

Estos modelos no pueden sustituir al personal médico y sanitario, pero ayudan a anticipar la evolución de la enfermedad y a desarrollar estrategias para combatirla. Son instrumentos útiles en un mundo donde una epidemia en un área remota puede convertirse súbitamente en un peligro global.

DURANTE EL VERANO DE 2014, los datos que llegaban día tras día sobre la epidemia de ébola en África occidental ofrecían un cuadro cada vez más claro de una crisis internacional. La situación parecía fuera de control, con un número de contagios y fallecidos en crecimiento exponencial. Para empeorar las cosas, existía la amenaza de una globalización de la epidemia, apuntada por los primeros casos en Estados Unidos y otros países, tanto europeos como africanos.

Para mi grupo de investigación, que forma parte del Centro para la Inferencia y Dinámica de las Enfermedades Infecciosas, dependiente de los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos, era por tanto natural unir fuerzas con un equipo de investigadores de tres universidades estadounidenses (la Fred Hutchinson de Seattle, la Universidad de Florida y la Universidad del Nordeste, en Boston) y dos centros de investigación italianos (la Fundación Bruno Kessler de Trento y la Fundación Instituto de Intercambio Científico de Turín) y poner de nuestra parte para contener la epidemia. Pero, en lugar de hacer las maletas y viajar a las zonas afectadas, nos pegamos a los superordenadores durante meses e hicimos números.

Demos un paso atrás. Nuestro trabajo de investigación se desarrolla en el campo de la llamada epidemiología computacional. En otras palabras, creamos en el ordenador una representación algorítmica y tan fiel como sea posible de la población mundial. Después, en ese mundo artificial introducimos una descripción lo más exacta que podemos de los mecanismos de transmisión de la enfermedad. Por último, y por medio de simulaciones digitales, predecimos la trayectoria futura de la epidemia en el tiempo y en el espacio.

Desde luego, este trabajo no puede sustituir al personal sanitario ni a la multitud de voluntarios que, cada vez que sobreviene una epidemia, se erigen como los verdaderos héroes de la situación. Son ellos los que, a menudo arriesgando la propia vida, combaten en primera línea, en los hospitales y en contacto con los enfermos. Pero la epidemiología computacional sí constituye un arma adicional: la «inteligencia» que puede ayudar a quienes están sobre el terreno a anticipar los movimientos del enemigo, proponiéndoles las mejores estrategias para combatirlo. En el caso del ébola, creamos situaciones virtuales a fin de evaluar la eficacia que tendría fabricar unidades de aislamiento para los enfermos, construir equipos para el entierro seguro de los fallecidos, o aplicar la vacuna que acabaría experimentándose con éxito en las fases finales de la epidemia.

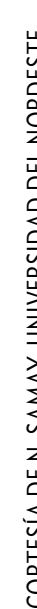
DATOS, DATOS Y MÁS DATOS

Tal y como los modelos atmosféricos tratan de predecir la trayectoria de las tormentas tropicales, los modelos de transmisión de enfermedades infecciosas intentan prever el comportamiento de las epidemias. Parece razonable pensar que el uso de modelos numéricos para la previsión de epidemias tendría que haber evolucionado a la par que su uso en las predicciones meteorológicas; sin embargo, no ha sido así.

El primer pronóstico meteorológico por ordenador se remonta a 1950. Fue obtenido en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton con el ENIAC, uno de los primeros ordenadores electrónicos, con más de 20.000 válvulas y 70.000 resistencias. Solo cinco años después, un proyecto civil y militar creaba el primer servicio de predicción meteorológica por cálculo numérico de los Estados Unidos. Hoy, los pronósticos meteorológicos están al alcance de todos gracias a servicios estatales y comerciales, accesibles desde aplicaciones para móvil o por Internet. La predicción meteorológica forma parte de nuestra vida cotidiana y ha popularizado importantes conceptos científicos, como el de sistema caótico o el de efecto mariposa.

La epidemiología matemática nació a mediados del siglo XVIII gracias al matemático suizo Daniel Bernoulli, y conoció su formalización teórica a principios del siglo XX en EE.UU. e Inglaterra con los trabajos de William Kermack, Anderson McKendrick, Lowell Reed y Wade Hampton Frost. Pero, pese a esta larga tradición teórica, la disciplina sufrió durante mucho tiempo la falta de los datos necesarios para predecir en tiempo real la evolución de una epidemia. Baste pensar que un trabajo de 1985 que sentó las bases para describir la propagación de epidemias de gripe por el transporte aéreo tuvo que esperar casi un

Continúa en la página 74

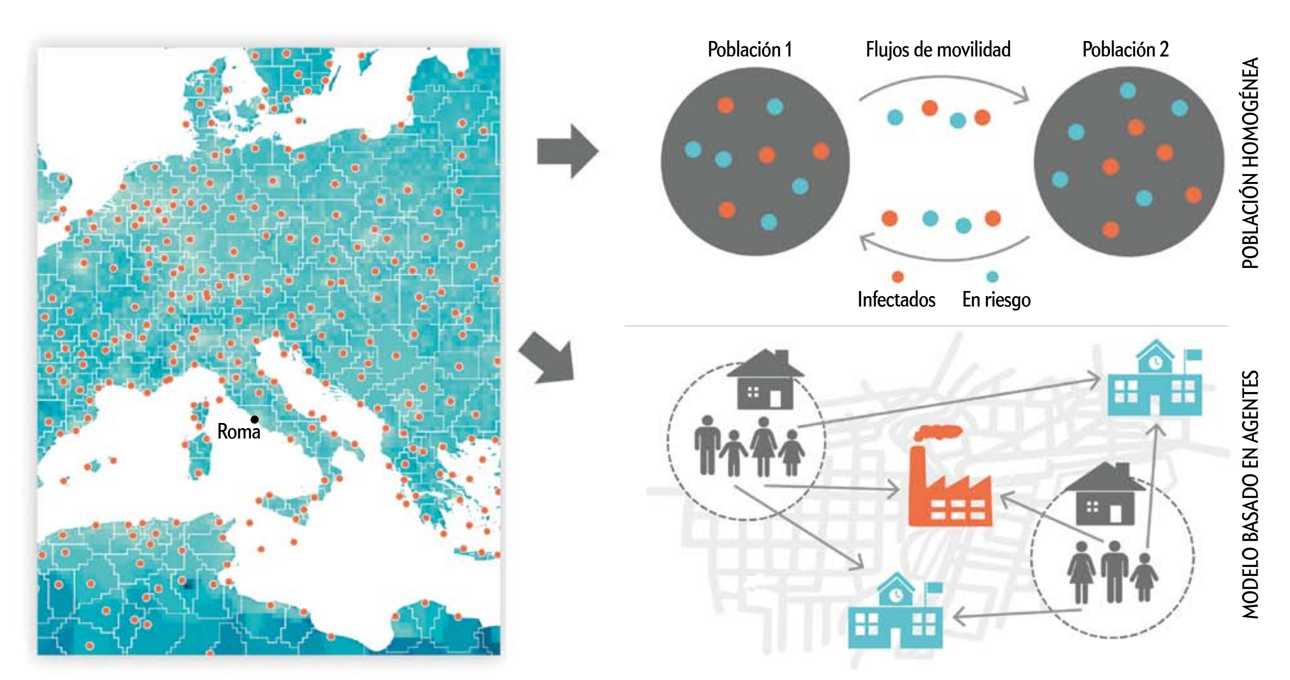


Simular una epidemia en un ordenador

La modelización computacional de una epidemia requiere dos pasos fundamentales: la incorporación de datos demográficos y de movilidad de los individuos (*arriba*) y la simulación de los procesos de infección (*abajo*). Esta última puede hacerse de varias maneras. En los modelos más detallados, conocidos como «modelos basados en agentes», el ordenador resuelve millones de ecuaciones que describen la dinámica de la epidemia a escala individual. Una aplicación informática de simulaciones epidemiológicas se encuentra disponible en www.gleamviz.org.



Desplazamientos: Este mapa ilustra el tipo de datos de movilidad que se incluyen en las simulaciones. Al modelizar los desplazamientos de los individuos de una gran ciudad, como Roma, se considera tanto el tráfico internacional (*mapamundi*) como la movilidad local (*inserto, en rojo*).



Procesos de contagio: Para modelizar la transmisión de una enfermedad, primero se subdivide la región de interés en áreas geográficas en torno a los principales núcleos urbanos (*izquierda, puntos rojos*). Luego se sigue el paso de los individuos infectados y el de aquellos que están en riesgo de enfermar. Esto puede hacerse tratando a la población de modo homogéneo, sin distinciones particulares (*derecha, arriba*), o mediante modelos basados en agentes, los cuales consideran a cada individuo atendiendo a su núcleo familiar y otras actividades cotidianas (*derecha, abajo*).

El futuro de la vacuna contra la gripe

Un método experimental faculta a las células inmunitarias para responder contra numerosas cepas, lo que haría innecesarias las predicciones anuales

Dina Fine Maron

Cada año, la gripe provoca multitud de muertes. Los investigadores clínicos y los profesionales sanitarios salvan vidas gracias a la elaboración de vacunas estacionales y al desarrollo de fármacos destinados a combatir el virus y las infecciones secundarias. Pero, solo en Estados Unidos, cientos de miles de personas son hospitalizadas y varias decenas de miles fallecen.

Gran parte del problema se resuelve con la elección correcta de las cepas víricas que las autoridades sanitarias escogen para luchar contra la gripe estacional. Un equipo chino-estadounidense ha diseñado una vacuna en forma de aerosol nasal que dejaría obsoleta esa predicción, pues faculta al sistema inmunitario para combatir multitud de cepas.

Un equipo de la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA) ha comunicado en *Science* haber logrado el punto idóneo al que se aspira con la vacuna antigripal: una respuesta inmunitaria muy potente que no cause daño a los animales infectados. A diferencia de las vacunas ordinarias, la nueva versión estimula una potente reacción de los linfocitos T, un tipo de leucocitos que lucha contra la infección. Hasta la fecha, la administración de la vacuna provoca la secreción de anticuerpos que actúan contra una variedad concreta del virus, que difiere según la cepa gripal. Pero, como los linfocitos T reconocerían diversas características del patógeno, una respuesta de ese tipo protegería, con toda probabilidad, contra varias cepas. «Se trata de una noticia excelente», afirma Kathleen Sullivan, directora del servicio de Alergia e Inmunología del Hospital Infantil de Filadelfia, ajena al trabajo.

¿Qué distingue al sistema de vacunación propuesto por el equipo de la UCLA de los otros? Las vacunas antigripales suelen contener una mezcla de cepas muertas. La inyección en el organismo de esa mezcla estimula la síntesis de anticuerpos capaces de fijarse a cualquier intruso parecido al virus, lo que impide la infección. Pero este método no desata una reacción intensa de los linfocitos, porque el virus está muerto. En cambio, la nueva forma en aerosol contiene un virus vivo, por lo que desencadena la respuesta de los anticuerpos y, a la par, la de los linfocitos T, cuanto menos en los hurones y los ratones de laboratorio. «La gran virtud de la vacuna reside en que genera una respuesta intensa en forma de anticuerpos, pero también por parte de los linfocitos T, que conforman una red de seguridad, pues si el virus vence la primera línea de defensa, estos garantizarán que la enfermedad sea leve», comenta Sullivan.



Los artífices de la vacuna multiplicaron el virus y analizaron la respuesta de diversas mutaciones ante la exposición al interferón, una proteína que el cuerpo libera ante el ataque vírico y que ayuda a contener la infección. Así descubrieron las mutaciones que con más probabilidad estimulan la acción de los interferones protectores. Con esa información, diseñaron una cepa mutante del virus gripal que se replica bien, pero que a la vez es muy sensible a la reacción de control desplegada por el cuerpo, los ingredientes ideales de una vacuna.

La inoculación ha dado buen resultado en hurones y ratones, los modelos habituales en el estudio de la gripe. Si se demostrara su eficacia en los humanos, la vacunación anual dejaría de ser necesaria, según los inventores. (No están seguros de la duración de la eficacia en las personas, pero los linfocitos T suelen conferir una inmunidad duradera.) Suponen que, puesto que la cepa creada en el laboratorio contiene ocho mutaciones, es improbable que el virus revierta a su forma original, más peligrosa (una preocupación habitual con cualquier vacuna de virus vivos). Y quizás el método sea más versátil: se podrían aislar otros virus en el laboratorio, detectar mutaciones apropiadas y elaborar vacunas contra otras muchas infecciones.

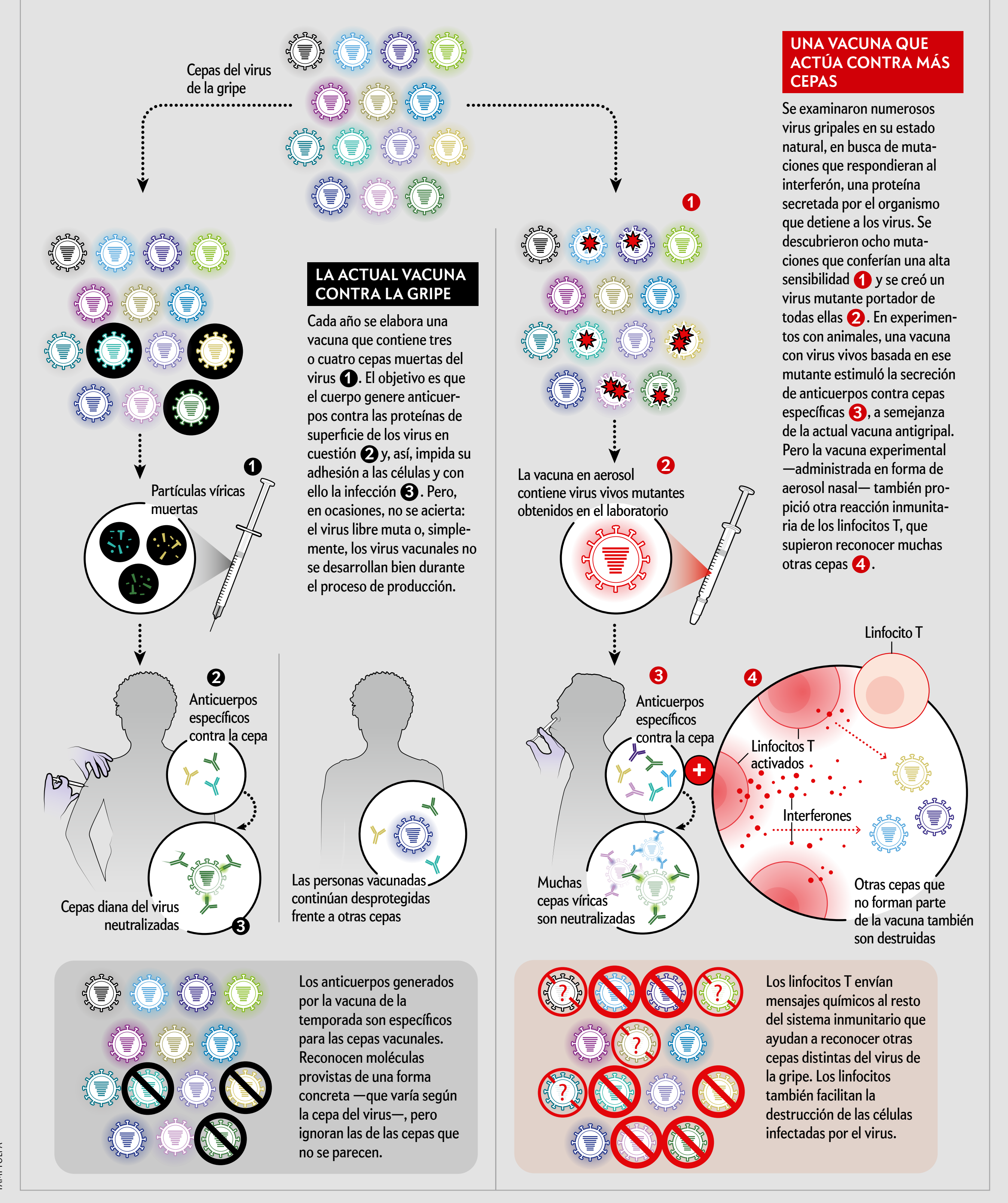
En un comentario publicado en *Science*, miembros del Instituto de Investigación Scripps advierten de que aún persisten numerosas trabas para la obtención de una vacuna universal contra la gripe. La mayor sería que, aunque el equipo de la UCLA consiga cierta protección cruzada contra un pequeño grupo de cepas —los subtipos H1N1 y H3N2— podría no suceder así con todas las variedades gripales. Sullivan señala, además, que habrá que examinar si la potente respuesta desatada contra el virus no es peligrosa, pues en la infección causada por el tipo de la gripe aviar H5N1, es el sistema inmunitario desbocado el que destruye el tejido pulmonar y, a veces, causa la muerte. Por último, matiza que «hay muchas cuestiones prácticas antes del lanzamiento, pero se trata de una novedad muy notable».

***Dina Fine Maron** es redactora adjunta de biología y medicina en* Scientific American.

HANNA BARCZYK

Mejorar la vacuna

Cada año se analizan los datos de vigilancia de la gripe para elegir las cepas del virus que podrían causar estragos en los hemisferios norte y sur. Las elegidas pasan a formar parte de la vacuna de la temporada. Pero, a veces, la predicción resulta errónea. Una vacuna universal que actuara contra multitud de cepas evitaría esas conjeturas, pero no es sencilla. Experimentos recientes en animales efectuados con un nuevo método nos acercarían a esa meta.



LA ACTUAL VACUNA CONTRA LA GRIPE

Cada año se elabora una vacuna que contiene tres o cuatro cepas muertas del virus ❶. El objetivo es que el cuerpo genere anticuerpos contra las proteínas de superficie de los virus en cuestión ❷ y, así, impida su adhesión a las células y con ello la infección ❸. Pero, en ocasiones, no se acierta: el virus libre muta o, simplemente, los virus vacunales no se desarrollan bien durante el proceso de producción.

Los anticuerpos generados por la vacuna de la temporada son específicos para las cepas vacunales. Reconocen moléculas provistas de una forma concreta —que varía según la cepa del virus—, pero ignoran las de las cepas que no se parecen.

UNA VACUNA QUE ACTÚA CONTRA MÁS CEPAS

Se examinaron numerosos virus gripales en su estado natural, en busca de mutaciones que respondieran al interferón, una proteína secretada por el organismo que detiene a los virus. Se descubrieron ocho mutaciones que conferían una alta sensibilidad ❶ y se creó un virus mutante portador de todas ellas ❷. En experimentos con animales, una vacuna con virus vivos basada en ese mutante estimuló la secreción de anticuerpos contra cepas específicas ❸, a semejanza de la actual vacuna antigripal. Pero la vacuna experimental —administrada en forma de aerosol nasal— también propició otra reacción inmunitaria de los linfocitos T, que supieron reconocer muchas otras cepas ❹.

Los linfocitos T envían mensajes químicos al resto del sistema inmunitario que ayudan a reconocer otras cepas distintas del virus de la gripe. Los linfocitos también facilitan la destrucción de las células infectadas por el virus.

TAMI TOLPA

Viene de la página 70
lustro hasta su completa realización. De igual modo, el primer estudio comparativo de modelos y agentes para examinar las estrategias de intervención contra una pandemia de gripe en EE.UU. no vio la luz hasta 2008.

En los últimos quince años, sin embargo, el campo ha experimentado una aceleración notable gracias a la gran disponibilidad de datos en áreas muy distintas, desde la secuenciación genética de los patógenos hasta la movilidad humana, pasando por toda la información que aportan las redes sociales y los dispositivos móviles. En general, la revolución de los macrodatos (*big data*) ha ido asociada a la mejora de procedimientos «inductivos», como la modelización estadística, o de técnicas de inteligencia artificial, como el aprendizaje automático.

Un ejemplo de este enfoque lo hallamos en Google Flu Trends. A partir del volumen de búsquedas asociadas a palabras clave como «fiebre» o «tos», esta aplicación creó un sistema automático de predicción de la temporada de gripe en Estados Unidos. A pesar de las limitaciones que acabarían causando su cierre —muchas debidas a la ausencia de una verdadera comprensión de la dinámica epidémica—, Google Flu Trends señaló el camino hacia lo que hoy se conoce como epidemiología digital. Además, los nuevos datos son revolucionarios por otra razón: permiten el entendimiento teórico y la formalización matemática de los mecanismos de contagio a escala individual, y, en consecuencia, el desarrollo de modelos que simulan la dinámica de la epidemia tanto en el tiempo como en el espacio.

DE LOS DATOS A LAS PREDICCIONES

En la base de los modelos epidemiológicos se encuentra la descripción espacial de la población humana. Proyectos como LandScan, patrocinado por la NASA, ofrecen estimaciones muy precisas de la población mundial con una resolución de hasta un kilómetro cuadrado. Sobre esta retícula, que describe la posición geográfica de los individuos, se pueden superponer datos de tipo sociodemográfico, como el número de habitantes por edad y sexo.

Con todo, las simulaciones de población más detalladas son aquellas que incluyen el vínculo de los individuos con sus núcleos familiares, lugares de trabajo y escuelas. Ello permite recrear en el ordenador una población que, desde el punto de vista estadístico, equivale a la real. Después pueden añadirse elementos relevantes para una descripción epidemiológica, como las infraestructuras hospitalarias y el personal sanitario a disposición de la población local. Finalmente, esa población virtual «cobra vida» gracias a la introducción de datos sobre movilidad y transportes, elementos que determinan los desplazamientos de los individuos. Este paso se obtiene integrando datos que van desde la movilidad aérea nacional e internacional hasta los recorridos de ida y vuelta diarios. En otras palabras, se concreta un mundo virtual que, en el ordenador, simula la vida cotidiana de millones o incluso miles de millones de individuos, sus movimientos y sus interacciones.

Sin embargo, para simular la propagación de una epidemia en este mundo artificial no hay un único modelo que describa todos y cada uno de los posibles patógenos. Al contrario, para cada agente infeccioso (virus, bacteria) se adopta una descripción de las fases que atraviesan los sujetos durante la enfermedad y de los mecanismos que caracterizan el contagio a otra persona. Por ejemplo, un individuo infectado puede estar todavía en el período de incubación. Pero, si bien este dura uno o dos días para el virus de la gripe, puede llegar hasta las tres semanas en el caso el del ébola. A menudo, los parámetros que caracterizan al patógeno se engloban en magnitudes que indican el número de casos secundarios generados por cada individuo infectado, o el tiempo que transcurre entre la observación del caso primario y el secundario. Estas variables caracterizan la transmisibilidad y la velocidad de propagación de la infección y, junto con otros parámetros epidemiológicos, determinan las ecuaciones y los algoritmos que describen la dinámica de la epidemia a través de la población. El grado de detalle de las aproximaciones puede variar de manera considerable, desde ecuaciones que modelizan a las personas como simples partículas sometidas a una «fuerza de infección» homogénea, hasta modelos que simulan cada proceso individual de infección y toman en consideración los diversos tipos de interacción entre sujetos (en la escuela, el trabajo, el núcleo familiar, etcétera).

Una vez introducidas en el ordenador las condiciones iniciales sobre la epidemia en cuestión (número de casos y su distribución inicial), se incorporan los modelos. Las predicciones responden a las preguntas de cuándo, dónde y cuánto: crean curvas que expresan, en función del lugar y el momento, el número de nuevas infecciones y nuevas hospitalizaciones, entre otras magnitudes que describen el curso de la epidemia.

Gracias a ese nivel de detalle, los modelos ofrecen información difícil de obtener con datos reales, como la relativa a las redes de invasión por la epidemia. Estas muestran, para cada núcleo urbano, de qué otras ciudades es más probable que se importe la infección. Ello permite prever los movimientos de la enfermedad y, por tanto, diseñar intervenciones. Por ejemplo, poder predecir la secuencia de cuáles serán las grandes ciudades golpeadas por una epidemia permite coordinar los esfuerzos internacionales, optimizar el empleo de vacunas y fármacos y alertar anticipadamente a los sistemas sanitarios de los lugares afectados.

PREDICCIONES EN TIEMPO REAL

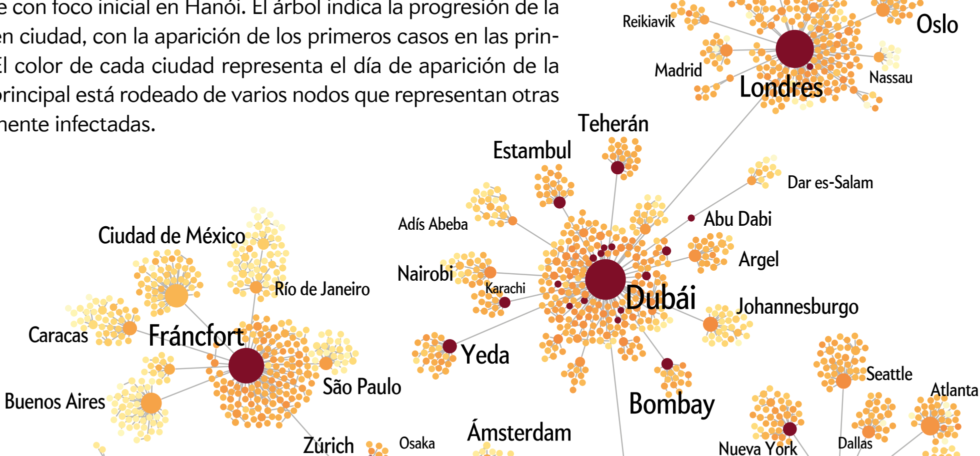
Al principio de una emergencia sanitaria, los datos que describen los mecanismos de contagio no son completos. Lo mismo se puede decir del número de casos observados sobre el terreno, donde la confusión que se crea genera datos escasos e incoherentes. Para superar estos problemas, los modelos deben calibrarse con complejos análisis estadísticos, basándose con frecuencia en hipótesis que solo pueden verificarse con un análisis de la sensibilidad de los resultados con respecto a los indicios experimentales que emanan de los datos.

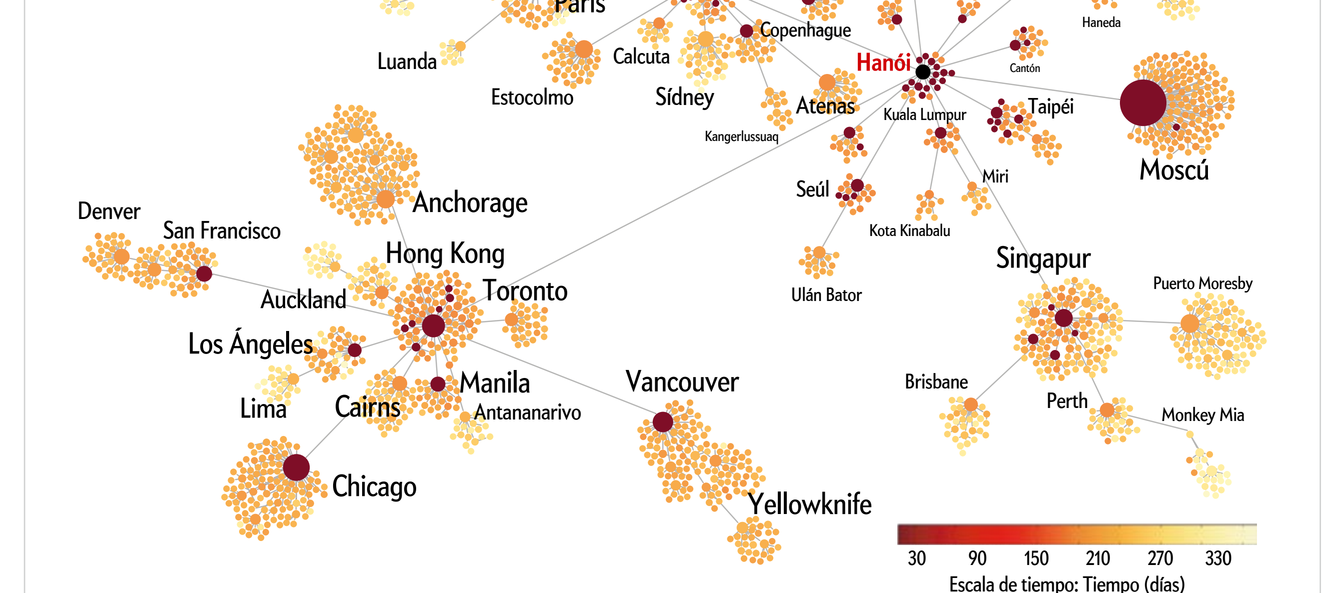
Ese proceso requiere muestrear los parámetros y las hipótesis del modelo mediante un gran número de simulaciones numéricas. Los resultados se comparan con los datos disponibles para definir los intervalos de confianza de los parámetros que determinan el modelo y sus predicciones. Esta calibración debe repetirse a medida que se dispone de nuevos datos; de esta manera se reduce la incertidumbre sobre los resultados y, al mismo tiempo, se representa el conocimiento cada vez más extenso que se va acumulando acerca de los procesos que determinan la propagación de la enfermedad.

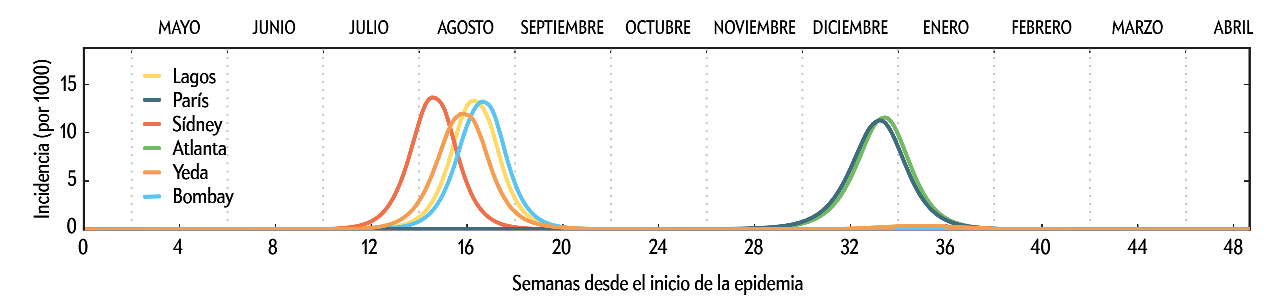
Claro está, un gran número de simulaciones requiere el uso de superordenadores y de técnicas algorítmicas que proporcionen resultados en tiempo real. Durante la campaña de simulaciones de la epidemia de zika en América Latina, mi grupo tuvo que gestionar la creación de más de 750.000 máquinas virtuales en la nube para ejecutar en tiempo real unos cálculos que hubiesen precisado 110 años en un ordenador de mesa. La epidemiología computacional se convierte así en un campo en el que las ciencias de la computación desempeñan un papel clave en los problemas de gestión de datos y optimización algorítmica.

La gripe, de ciudad en ciudad

Los modelos computacionales permiten pronosticar el avance de una epidemia con un alto grado de resolución. Este esquema muestra el árbol de contagio de una hipotética pandemia de gripe con foco inicial en Hanói. El árbol indica la progresión de la enfermedad de ciudad en ciudad, con la aparición de los primeros casos en las principales áreas urbanas. El color de cada ciudad representa el día de aparición de la infección. Cada núcleo principal está rodeado de varios nodos que representan otras áreas urbanas sucesivamente infectadas.







Contagio mundial: Esta gráfica muestra la evolución temporal de la pandemia en algunas ciudades del globo. Las zonas templadas del hemisferio norte sufren un pico epidémico durante los meses de diciembre y enero, mientras que las del hemisferio sur lo experimentan en julio y agosto. Ello se debe al aumento de la transmisibilidad del virus durante los meses más fríos del año (en las zonas tropicales los brotes pueden producirse durante todo el año).

Además de permitir el trabajo con grandes modelos, las nuevas tecnologías informáticas también nos proporcionan acceso a la riqueza de la información generada por nuevas fuentes de datos, en especial las redes sociales. Por ejemplo, mi grupo trabajó durante varios meses en el análisis diario de más de 800.000 mensajes de Twitter, a fin de seleccionar los que hablaban de tos y fiebre e inicializar los modelos de predicción de la temporada de gripe en los Estados Unidos. Nuevas aplicaciones para dispositivos móviles permiten crear redes de ciudadanos que transmiten voluntariamente su estado de salud en tiempo real. Un ejemplo es la red europea Influenzanet (en España, Gripenet), que sigue la temporada de gripe gracias a 40.000 voluntarios de 12 países europeos. En otras palabras, el arsenal para la batalla contra las epidemias se ha enriquecido con la epidemiología digital.

Los datos de Influenzanet, por ejemplo, forman parte del informe epidemiológico semanal sobre la gripe que elabora el Instituto Superior de Sanidad de Italia. Y, desde 2012, el Centro de Control de Enfermedades de Estados Unidos recoge las predicciones de una docena de modelos computacionales para el pronóstico de la gripe. El enfoque digital refuerza, pues, los sistemas clásicos de vigilancia de la salud pública.

MÁS ALLÁ DE LAS PREDICCIONES

Los éxitos, y algunas veces los fracasos, de los modelos predictivos epidemiológicos han merecido la atención de los medios de comunicación. En situaciones de crisis, como la epidemia de ébola de 2014, los modelos son objeto de constante escrutinio por parte de las instituciones sanitarias, como la Organización Mundial de la Salud, el Centro de Control de Enfermedades de Estados Unidos y el Centro Europeo para la Prevención y el Control de las Enfermedades. Durante la epidemia, no todas las predicciones fueron acertadas. Algunas proyecciones que calcularon el número de casos con muchos meses de adelanto sobreestimaron lo que ocurriría. Los modelos de otros grupos, entre ellos el nuestro, se acercaron mucho más al número de casos reales: más de 28.000 contagios y 11.000 fallecimientos. Como en las predicciones meteorológicas, los análisis sobre la evolución de la epidemia deben considerar todo un conjunto de modelos, desarrollados con técnicas diferentes por diversos grupos de investigación y ponderados con arreglo a sus historiales de servicio. Esta forma de proceder define el «cono de incertidumbre», el error estadístico de las predicciones, que crece con el horizonte temporal.

Pero la importancia de los modelos computacionales en epidemiología va mucho más allá de las simples predicciones del número de casos de una enfermedad al cabo de una o dos semanas. Los modelos predictivos proporcionan escenarios y análisis cuantitativos que sustentan la planificación de las intervenciones en salud pública. Por ejemplo, un modelo puede simular el efecto de las medidas de contención basadas en restringir la movilidad de los individuos; es decir, estudiar cómo variará la cantidad de infectados importados si se reduce el número de viajeros procedentes de los lugares afectados por la epidemia. Ello permite analizar los costes y los beneficios de medidas como la supresión de vuelos o el cierre de fronteras, como sucedió durante la epidemia de ébola. También podemos analizar diversos escenarios para la distribución de vacunas y medicamentos, o el efecto de cerrar escuelas y centros de trabajo para ralentizar el contagio. Todas estas situaciones solo se pueden estudiar con ayuda de un ordenador, ya que su realización práctica no solo tiene costes enormes, sino también efectos irreversibles.

La desigualdad de las vacunas

La misma actuación preventiva puede ser menos eficaz en los barrios pobres que en los ricos

Lee Riley

A menudo se culpa a las carencias de los servicios sanitarios de la alta incidencia de enfermedades en los barrios marginales, pero no es la única razón por la que la salud es más precaria que en los barrios acomodados. Las enfermedades infecciosas pueden diferir en sus características biológicas básicas entre los vecindarios ricos y pobres, diferencias que van en detrimento de las vacunas destinadas contra ellas.

Varios especialistas hemos constatado esos efectos en el caso de la cardiopatía reumática en zonas desfavorecidas de Brasil. Desaparecida en la práctica en los países ricos, donde los antibióticos son asequibles, dicha enfermedad ocasiona problemas cardíacos importantes en los países menos prósperos, donde con frecuencia resulta mortal. La causa es la amigdalitis de repetición por estreptococos del grupo A (EGA). Cuando el sistema inmunitario ataca a esas bacterias, también reacciona contra ciertas proteínas de las células de las válvulas cardíacas, por su semejanza con las proteínas bacterianas.

Una vacuna evitaría esas infecciones, pero los EGA no son una diana fácil, puesto que se conocen más de 120 cepas y en unas simples anginas pueden concurrir varias. Cada cepa posee una versión distinta del gen que codifica la proteína M, componente básico de la membrana externa bacteriana. En una vacuna experimental se incorporaron proteínas M de 26 cepas comunes, con el fin de garantizar la inmunización. Pero, cuando se examinó a pacientes afectados por EGA que no residían en Europa ni en EE.UU., la frecuencia de los 26 tipos resultó mínima o nula. Las cepas en cuestión eran habituales en los países ricos, donde se había elaborado la vacuna, pero constituían una rareza en otros lugares, por lo que esta resultaría menos eficaz.

Hasta en una misma ciudad existen diferencias biológicas. Mi equipo comparó las cepas de EGA procedentes de niños de las favelas y de los barrios adinerados de Salvador de Bahía. A las cepas recogidas en cada vecindario se les asignó un número denominado índice de diversidad. Cuanto mayor es el número de cepas provistas de genes distintos de la proteína M, mayor es el índice. El correspondiente a las cepas EGA de los niños de barrios acomodados —beneficiarios de seguros privados de salud y atendidos en clínicas privadas— rondaba el 0,90, similar al de los países desarrollados. Pero el índice de los menores desfavorecidos era más alto: 0,96. Y no era la única diferencia: las dos cepas más frecuentes en los países ricos representaban el 36 por ciento de las muestras de EGA tomadas de los niños de los barrios acomodados de Brasil, pero solo el 19 por ciento de las halladas en dos centros sanitarios de barrios



HANNA BARCZYK

pobres. Si esta vacuna experimental se administrara en Salvador de Bahía, sería mucho menos eficaz en la población infantil de las favelas.

La mayor diversidad de las cepas de EGA en los barrios marginales puede ser consecuencia de la mutación bacteriana facilitada por el intercambio de genes. Este intercambio es más fácil en condiciones de hacinamiento, pues propician un contacto más frecuente entre las células bacterianas y mayor probabilidad de intercambio génico. La diversidad de cepas agravaría el riesgo de una reacción inmunitaria lesiva para el corazón.

También se sabe que un problema vinculado a la vacuna contra el virus del papiloma humano (VPH), considerado el causante del cáncer de cuello uterino, se debería a disparidades en los tipos de este virus. Varios estudios indican que una parte de las mujeres afroamericanas que viven en zonas del sudeste de EE.UU. sufren infecciones por otras cepas del VPH. No sabemos si estas diferencias raciales y geográficas en cuanto al tipo de virus pueden acabar reduciendo la eficacia de la vacuna. Lo que sí sabemos en este momento es que no es solo el acceso a la sanidad lo que determina la eficacia de los tratamientos, sino también las diferencias en el patógeno en cuestión, condicionadas en parte por el entorno social.

Lee Riley, *médico especialista en epidemiología y biología molecular, es el director de la división de enfermedades infecciosas y vacunas en la Escuela de Salud Pública de la Universidad de California, en Berkeley (EE.UU.).*

Además, las simulaciones por ordenador suelen llevar a resultados poco intuitivos que difícilmente podrían adivinarse con análisis no cuantitativos. La dinámica no lineal de los sistemas epidemiológicos no siempre salta a la vista, y los cambios en los términos de las ecuaciones que describen la transmisión no se reflejan proporcionalmente en los resultados. Un ejemplo clásico lo ofrece la restricción de la movilidad de los individuos, la cual tiene efectos limitados en la contención de las epidemias, incluso con reducciones drásticas de más del 50 por ciento del tráfico aéreo nacional e internacional. En las simulaciones se observa que este tipo de medidas generan retrasos de apenas unas semanas en la propagación de la enfermedad; sin embargo, suponen un coste insostenible para las compañías aéreas mundiales y generan un efecto dominó sobre otros sectores de la economía. En 2015, el Banco Mundial calculó en 2200 millones de dólares las pérdidas totales para los países afectados por la epidemia de ébola. Este análisis ha tenido peso también en las políticas de control de fronteras durante la crisis, cuando muchos países pensaron en aislar las regiones afectadas.

Otro ejemplo de la importancia de las simulaciones lo dan las situaciones en las que es imposible obtener datos experimentales sobre el terreno. Es el caso del zika, un virus transmitido de persona a persona por la picadura de los mosquitos *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus* (mosquito tigre). El patógeno se conoce desde los años cincuenta y es endémico en algunas regiones de África y Asia. El incremento anómalo de casos de microcefalia en neonatos en el norte de Brasil, relacionado con la infección por zika de mujeres embarazadas, se detectó solo en 2015. En febrero de 2016, la Organización Mundial de la Salud decretó una emergencia pública sanitaria de alcance internacional, dado que el virus no se había observado nunca en América Latina. Desde ese momento, la marcha del zika a través de Sudamérica, el Caribe y, finalmente, Estados Unidos fue registrada por los servicios de control sanitario, que comenzaron a identificar pacientes mediante serologías que detectaban los anticuerpos específicos.

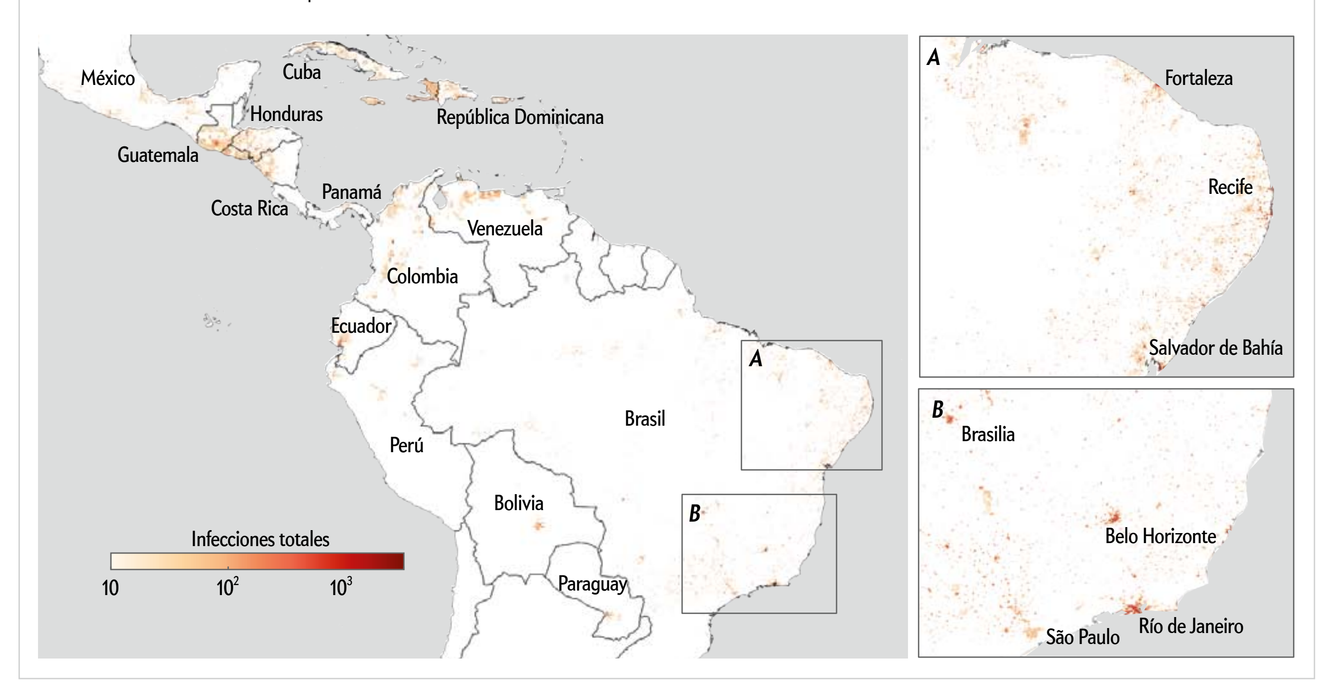
No obstante, antes de mediados de 2015, la historia del zika en América Latina permaneció prácticamente oculta, dado que ningún organismo sanitario había realizado los análisis pertinentes. Los modelos se convierten entonces en el único modo de abrir una ventana al pasado del virus. En tales casos, los modelos no solo deben considerar los datos concernientes a la población y a su movilidad, sino también los relativos a la abundancia de mosquitos, el clima, los cambios de temperatura a lo largo del año y todos los demás factores que pueden determinar la transmisión del virus del ser humano al mosquito y viceversa. Por ejemplo, los datos resultantes de los análisis de nuestro grupo con un modelo que simulaba la difusión de la epidemia en América Latina indicaban que, sorprendentemente, la introducción del zika en Brasil se produjo como muy tarde en los primeros meses de 2014; es decir, casi dos años antes de la gran oleada de casos que se observó en 2016. En situaciones así, los modelos recrean la evolución de la epidemia y, potencialmente, responden a complejas cuestiones relativas al impacto pasado de la epidemia en otras regiones.

LA BATALLA CONTRA LA PRÓXIMA PANDEMIA

En las últimas décadas hemos asistido a numerosos e importantes hitos de la historia de la medicina, como la aparición de los antibióticos, la erradicación de la viruela y la casi total erradicación de la poliomielitis. Estas victorias nos han llevado a creer que estamos cerca de vencer a las enfermedades infecciosas para siempre. Por desgracia, los últimos años han

La evolución del zika en Sudamérica

En 2015 se detectó en Brasil un incremento anómalo de casos de microcefalia en neonatos debido a la infección por zika de mujeres embarazadas. Estos mapas muestran el número de casos de zika en Sudamérica y el Caribe desde el comienzo de la epidemia hasta enero de 2017. Fueron generados con un modelo computacional de alta resolución (cada punto es un kilómetro cuadrado) que necesitó el uso en paralelo de 10.000 procesadores para resolver más de 10 millones de simulaciones. Estas incluían tanto la dinámica humana como la del mosquito transmisor del patógeno. La gran heterogeneidad de la incidencia fue debida tanto a factores socioeconómicos como a la abundancia del insecto.



supuesto un jarro de agua fría en ese sentido. La pandemia de gripe de 2009, responsable de más de 280.000 muertes en todo el mundo; la epidemia de ébola en África occidental en 2014, con más de 11.000 muertos; y la epidemia de zika, responsable de millones de infecciones en América Latina en 2016, nos han demostrado lo frágil que es nuestra sociedad frente a la amenaza de virus y bacterias. Vivimos en un mundo cada vez más interdependiente, donde las epidemias se extienden a través de los aeropuertos de todo el mundo. Una nueva epidemia en una zona remota de África puede acabar convirtiéndose en una amenaza global potencialmente devastadora.

Los modelos numéricos que describen la dinámica de una epidemia han desempeñado un papel cada vez más activo en varias crisis internacionales. Sin embargo, debemos ser conscientes de los numerosos límites teóricos y tecnológicos que aún hay que superar. Los huracanes no se preocupan por nuestras predicciones; sin embargo, las personas sí cambian su conducta en virtud de la información y el conocimiento adquiridos sobre los riesgos que plantea una epidemia. La modelización en tiempo real del ciclo de retroalimentación entre la evolución de una enfermedad y la respuesta de la sociedad sigue siendo un problema importante que influye en la capacidad predictiva de los modelos. Otra dificultad es la ausencia de un conocimiento sistemático del poder predictivo de los diferentes tipos de modelo. ¿Cómo afecta la complejidad de los modelos a la precisión de sus predicciones? ¿Cómo influye la calidad de los datos en la fiabilidad o la precisión de los modelos epidemiológicos? Estas cuestiones siguen siendo objeto de investigación.

En este contexto, urge desarrollar las colaboraciones e iniciativas necesarias para promover la epidemiología computacional. La pregunta no es si ocurrirá, sino cuándo. Con toda seguridad, antes o después habremos de librar una nueva batalla contra otra pandemia. Esta es una llamada a las armas que debería reunir a todo el mundo de la investigación y a la sociedad civil.

PARA SABER MÁS

The parable of Google Flu: Traps in big data analysis. D. Lazer et al. en *Science*, vol. 343, n.º 6176, págs. 1203-1205, marzo de 2014.

Spatiotemporal spread of the 2014 outbreak of Ebola virus disease in Liberia and the effectiveness of non-pharmaceutical interventions: A computational modelling analysis. S. Merler et al. en *The Lancet Infectious Diseases*, vol. 15, n.º 2, págs. 204-211, febrero de 2015.

Spread of Zika virus in the Americas. Q. Zhang et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, n.º 22, E4334-E4343, mayo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Modelos de propagación de enfermedades. Joan Saldaña en *IyC*, octubre de 2013.

¿Cómo prever y contener epidemias como la del zika? Robert L. Dorit en *IyC*, diciembre de 2016.

RECURSOS NATURALES

¿COMPENSA LA MINERÍA



EN AGUAS PROFUNDAS?

Comienza la carrera por explotar —y proteger— el fondo oceánico

Thomas Peacock y Matthew H. Alford

Fotografías de Brett Stevens



LOS NÓDULOS DE MANGANESO extraídos del fondo oceánico contienen metales valiosos.

Thomas Peacock es profesor de ingeniería mecánica y director del Laboratorio de Dinámica Ambiental del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Matthew H. Alford es profesor de oceanografía física y director asociado del Laboratorio de Física Marina del Instituto Scripps de Oceanografía.

ESTAMOS A 50 KILÓMETROS DE LAS COSTAS DE SAN DIEGO,

SOBRE MIL METROS DE AGUA. A BORDO DEL BUQUE oceanográfico *Sally Ride*, ocho contenedores del tamaño de un automóvil almacenan sedimentos del fondo del océano Pacífico. Esta mañana los mezclamos con agua marina en un tanque; después, durante una hora, los vertimos por la banda del barco con una gruesa manguera que penetraba 60 metros bajo la superficie del mar.

A lo largo de seis horas hemos observado la dispersión de un penacho de partículas que se hundía y alejaba, arrastrado por las corrientes oceánicas. Unos sensores colgados del barco medían la forma del penacho y la concentración del sedimento en la columna de agua mientras las señales se debilitaban.

Queríamos tomar datos sobre una cuestión acuciante: la minería en el fondo oceánico. A miles de metros bajo la superficie del mar se acumulan nódulos del tamaño de un puño que contienen minerales valiosos, en especial níquel, cobre y cobalto. Unos robots recolectores, del tamaño de cosechadoras, surcarían el fondo succionando la capa de sedimentos más superficial, donde se encuentran los nódulos, y levantando una nube de partículas. Bombearían los nódulos por unos gruesos tubos de varios kilómetros de longitud hasta unos barcos donde diariamente se separarían millones de densos nódulos metálicos y se verterían al mar los sedimentos restantes, que se hundirían formando un penacho. ¿Cómo afectaría todo ello a los seres vivos? Nuestro ensayo constituía un primer paso con el objetivo de obtener una respuesta parcial.

La demanda mundial de metales aumenta sin tregua. Algunas de las minas terrestres de las que se extraen minerales de elevada calidad se están agotando. Compañías como Global Sea Mineral Resources (GSR) y UK Seabed Resources se interesan por la minería en aguas profundas. Piensan que los costes serán menores que en la minería en tierra firme, sobre todo cuando en esta haya que explotar yacimientos con menas de ley más baja y más difíciles de extraer.

Algunos países que no cuentan con grandes recursos minerales en tierra, como Japón o Corea del Sur, quieren prospectar fondos marinos que albergan grandes yacimientos. En septiembre de 2017, la Corporación Nacional de Petróleo, Gas y Metales de Japón realizó uno de los primeros ensayos comerciales a gran escala. Un prototipo de excavadora extrajo toneladas de zinc y otros metales a 1600 metros de profundidad cerca de Okinawa, en aguas territoriales de Japón. Las pequeñas regiones y naciones insulares, como Tonga y las islas Cook, se plantean si deberían ofrecer derechos de minería dentro de sus aguas a inversores extranjeros. Y la Autoridad Internacional de los

EN SÍNTESIS

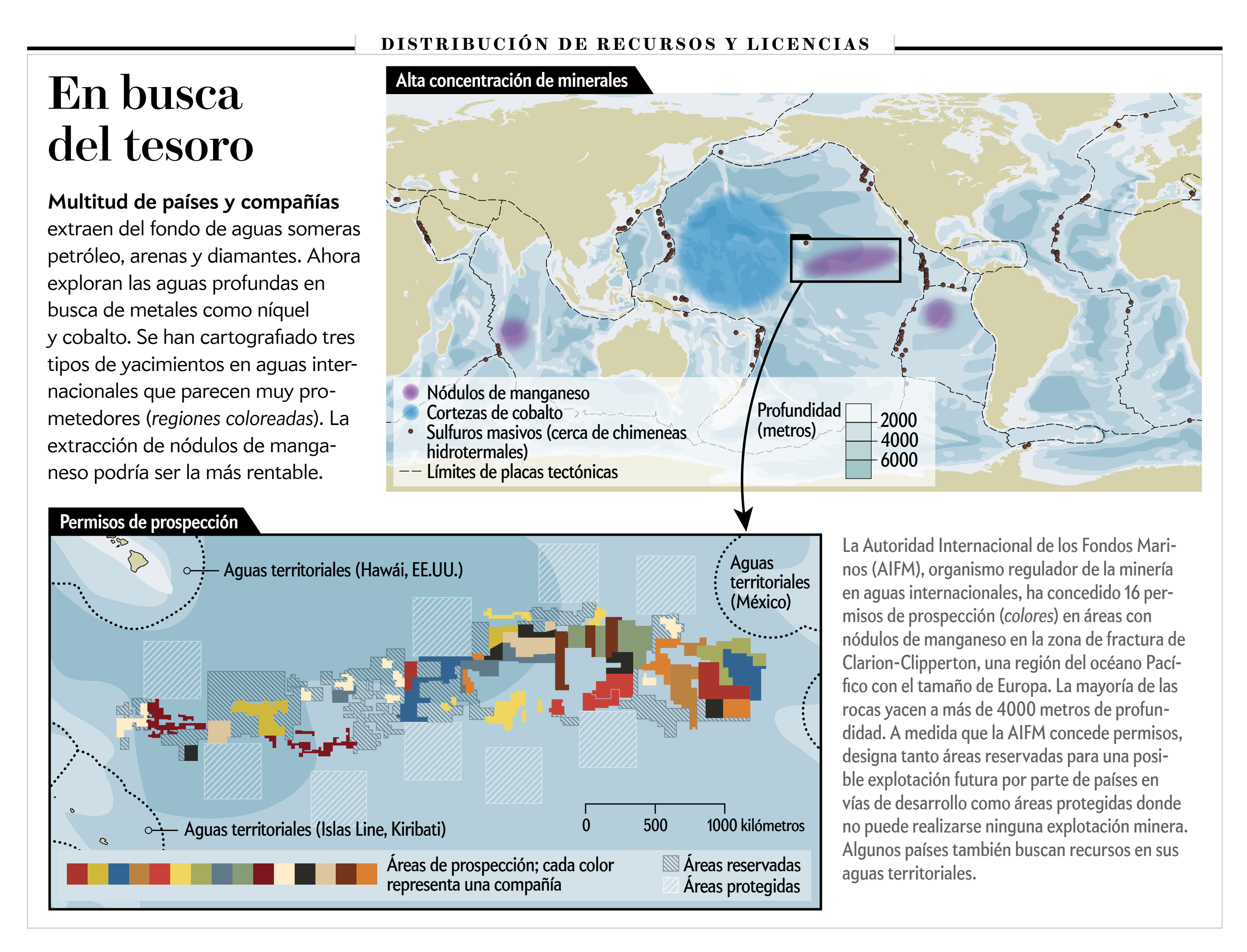
La demanda de ciertos minerales está mostrando un rápido crecimiento. A medida que se agotan los yacimientos terrestres más rentables, los países y las compañías podrían optar por la minería en aguas profundas.

El níquel, el cobre y el cobalto abundan en unos nódulos del tamaño de puños diseminados en el fondo oceánico, en ocasiones a más de 4000 metros de profundidad.

Las máquinas extraerían esos nódulos y dispersarían sedimentos por el fondo marino. Desde la superficie, los barcos verterían más sedimento en las aguas. Sin embargo, la minería terrestre también afecta al entorno.

La búsqueda de vías para minimizar las consecuencias podría llevar a una regulación sabia, siempre y cuando la investigación continúe al mismo ritmo que se desarrolla la industria.

DISTRIBUCIÓN DE RECURSOS Y LICENCIAS



En busca del tesoro

Multitud de países y compañías extraen del fondo de aguas someras petróleo, arenas y diamantes. Ahora exploran las aguas profundas en busca de metales como níquel y cobalto. Se han cartografiado tres tipos de yacimientos en aguas internacionales que parecen muy prometedores (*regiones coloreadas*). La extracción de nódulos de manganeso podría ser la más rentable.

La Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (AIFM), organismo regulador de la minería en aguas internacionales, ha concedido 16 permisos de prospección (*colores*) en áreas con nódulos de manganeso en la zona de fractura de Clarion-Clipperton, una región del océano Pacífico con el tamaño de Europa. La mayoría de las rocas yacen a más de 4000 metros de profundidad. A medida que la AIFM concede permisos, designa tanto áreas reservadas para una posible explotación futura por parte de países en vías de desarrollo como áreas protegidas donde no puede realizarse ninguna explotación minera. Algunos países también buscan recursos en sus aguas territoriales.

FUENTES: WORLD OCEAN REVIEW 1. MARIBUS, 2010 (*mapa mundial*); AUTORIDAD INTERNACIONAL DE LOS FONDOS MARINOS. BASE DE DATOS POR CLAUS *ET AL.* INSTITUTO MARINO FLANDERS. ACCEDIDA EN WWW.MARINEREGIONS.ORG EL 24 DE NOVIEMBRE DE 2016 (*inserto*); DOLLY HOLMES (*mapas*)

Fondos Marinos (AIFM), que regula la actividad comercial en aguas internacionales, ha concedido 28 permisos de prospección a instituciones de 20 países.

Los científicos se esfuerzan en dilucidar cuáles serán los perjuicios y qué podría minimizarlos. Los Gobiernos, la industria, la AIFM, las universidades y las organizaciones científicas cooperan en proyectos de investigación como el nuestro. A diferencia de lo ocurrido con el carbón, el petróleo, el fósforo y otros recursos, la comunidad científica tiene ahora la oportunidad de colaborar con las partes interesadas para crear salvaguardas antes de que se desarrolle una gran industria extractora, así como de comparar los efectos de la minería en aguas profundas y los de la minería en tierra.

RECOMPENSAS EN NÍQUEL, COBRE Y COBALTO

Hace siglo y medio, un grupo de exploradores suecos descubrió yacimientos en el mar de Kara, al norte de Siberia. El hallazgo se confirmó entre 1870 y 1880, durante la expedición del *HMS Challenger*, un hito de la oceanografía. Más tarde, en los años setenta del siglo pasado, la CIA urdió una trama para enmascarar su intento de exhumar el naufragado submarino soviético *K-129* con una supuesta busca de nódulos de manganeso en el Pacífico. Pero las dificultades tecnológicas y los bajos precios de los minerales disuadían la prospección comercial.

El interés ha aumentado en la última década. Debido al crecimiento de la población mundial, la urbanización, el aumento del consumo y el gran desarrollo de tecnologías que dependen de ciertos metales, las previsiones del mercado se han disparado. Se estima que la demanda mundial anual de níquel, hoy de 2 millones de toneladas, crecerá un 50 por ciento para 2030. Las reservas terrestres albergan unos 76 millones de toneladas. Más o menos la misma cantidad yace en forma de nódulos en la zona de fractura de Clarion-Clipperton (ZFCC), una alargada llanura abisal que se extiende desde Hawái hasta la península de la Baja California. Con el cobalto ocurre algo similar: las reservas terrestres, de 7 millones de toneladas, equivalen o son inferiores a las que contienen los nódulos de esa zona.

Existen tres tipos de yacimientos prometedores. El primero consiste en chimeneas hidrotermales activas o inactivas: fisuras abiertas por la actividad volcánica por las que mana material caliente a lo largo de los límites entre placas tectónicas. Denominados sulfuros masivos de fondo oceánico, estos constituyen depósitos con un alto contenido en cobre, zinc, plomo y oro. Papúa Nueva Guinea ha concedido permiso a la compañía canadiense Nautilus Minerals para extraerlos en sus aguas territoriales, en Solwara 1, un terreno inactivo. Al mismo tiempo, la AIFM ha concedido siete contratos de prospección de sulfuros en aguas internacionales. Por la singularidad de los ecosistemas asociados, los científicos han solicitado una moratoria para la explotación minera de los puntos activos.

Un segundo tipo de depósitos, las cortezas de cobalto, se forman en la cima y en los flancos de montes submarinos por precipitación natural de metales desde el agua marina. Crecen muy despacio, unos milímetros cada millón de años, y suelen

alcanzar grosores de entre cinco y diez centímetros. Además de cobalto, contienen níquel y otros metales de interés. Aunque la AIFM ha concedido cuatro licencias de prospección en el Pacífico occidental, la explotación de estas cortezas es complicada, puesto que no resulta fácil arrancarlas del sustrato rocoso.

Por último, la mayoría de los proyectos de minería en aguas profundas se centra en los depósitos de nódulos polimetálicos, o «de manganeso». En lo que sigue nos ceñiremos exclusivamente a este tipo de minería. Estos nódulos se encuentran diseminados por el fondo oceánico o parcialmente enterrados en extensas áreas de sedimentos. Se forman a varios miles de metros de profundidad, conforme los metales precipitan sobre un fragmento de detrito y forman un núcleo cuyo diámetro crece un centímetro cada millón de años.

La AIFM ha concedido 16 permisos para explotar nódulos en la FZCC. Aunque de composición variable, los nódulos de esa zona suelen contener alrededor de un 3 por ciento en peso de níquel, cobre y cobalto, los metales deseados. Alrededor del 25 por ciento es manganeso, por lo que su explotación a gran escala aumentaría con creces su producción mundial. El resto son materiales endurecidos sin interés económico.



NÓDULOS DE MANGANESO extraídos del fondo del océano Pacífico durante un muestreo de la compañía canadiense Nautilus Minerals.

NAUTILUS MINERALS

NÓDULOS: EL NUEVO ORO

La prospección requiere meses de trabajo con instrumentos a bordo de un barco, vehículos autónomos subacuáticos y recolectores con forma de caja que descienden para tomar muestras. Debido a la gran extensión de las áreas exploradas, esas muestras se extrapolan al resto de la zona. Se considera que una explotación es económicamente viable si la concentración de nódulos excede los 10 kilogramos por metro cuadrado; si apenas están cubiertos por sedimentos, lo que facilita la extracción; y si la pendiente del fondo marino no supera el 10 por ciento, a fin de que sea accesible a los vehículos recolectores.

La pieza clave son estos últimos. Alimentados desde el barco con un cable eléctrico, escarbarían en el fondo y recorrerían unos 50 kilómetros al día, probablemente yendo y viniendo a lo largo de un trazado reticular. A su vez, serían guiados por vehículos autónomos sumergibles que examinarían el entorno.

A medida que succionara los nódulos y el sedimento que los acompaña, el recolector llevaría a cabo una separación inicial, dejando atrás una nube de sedimento indeseado. Una larga manguera dotada de una serie de bombas enviaría el lodo con los nódulos hasta el barco: un sistema de bombeo que ya emplean las industrias del petróleo, el gas y los dragados. La embarcación separaría los nódulos y devolvería el sedimento indeseado al fondo marino mediante una manguera de expulsión. Grandes cargueros transportarían los nódulos hasta una planta de procesamiento situada en tierra, donde se extraerían los metales deseados.

Para obtener beneficios, las compañías han de extraer tres millones de toneladas de nódulos secos al año. Ello produciría unas 37.000 toneladas de níquel, 32.000 de cobre, 6000 de cobalto y 750.000 de manganeso.

REPERCUSIÓN EN LOS ORGANISMOS VIVOS

La AIFM fue establecida en virtud de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (UNCLOS), la cual exige que las naciones tomen todas las medidas posibles para proteger el medio marino. La AIFM concede permisos de prospección en áreas de 150.000 kilómetros cuadrados. Dado que los países que se adhirieron a la UNCLOS (167 naciones y la Unión Europea) consideran el fondo marino internacional como patrimonio común de la humanidad, una compañía que desee explotar sus recursos debe estar bajo el amparo de un país que haya ratificado la convención. Finalizada la prospección, debe dividir el terreno en dos mitades, y la AIFM decide cuál de las dos reserva para su explotación por parte de un país en desarrollo.

Los estudios indican que es probable que, de los 75.000 kilómetros cuadrados asignados a una compañía, la explotación sea económicamente viable en 10.000 de ellos (alrededor del 0,2 por ciento de la ZFCC). Los recolectores extraerían los primeros 10 o 15 centímetros del suelo marino y compactarían el suelo de la zona. En los nódulos y en los sedimentos viven multitud de organismos con tamaños de 50 micras o más. La mayor parte de ellos perecerían durante la batida del terreno o se asfixiarían tras depositarse sobre ellos los penachos de sedimentos.

Se desconoce qué ocurrirá con las bacterias. Se levantarán del fondo junto con el sedimento y se depositarán de nuevo a kilómetros de distancia. A las que tengan los nódulos como sustrato no les irá bien. Dado que los nódulos tardan millones de años en formarse, y que las comunidades biológicas alejadas de las chimeneas hidrotermales se desarrollan muy despacio, las regiones explotadas no se recuperarán en una escala temporal humana. Hace 30 años, un grupo de investigadores alemanes trazó con un trineo los surcos de una supuesta explotación minera a 4100 metros de profundidad en la cuenca del Perú. Cuando volvieron en 2015, los surcos permanecían casi intactos.

El efecto de las nubes de sedimentos levantadas por el recolector es otro motivo de preocupación. Las débiles corrientes de las profundidades oceánicas, que avanzan a un ritmo de pocos centímetros por segundo, podrían transportar las partículas y alejarlas muchos kilómetros de la zona donde opera el recolector. Gran parte del sedimento es fino, de unos 0,02 milímetros de diámetro, y suele hundirse a una velocidad de un milímetro por segundo. El sedimento que alcance 10 metros de altura en las corrientes del fondo podría alejarse hasta 10 kilómetros del lugar de la explotación.

Pero puede que esa estimación peque de simple. Los sedimentos más finos tienden a agregarse y a formar flóculos de mayor tamaño. Estos se depositarían más rápido que las par-

tículas individuales, lo que restringiría la extensión horizontal de los penachos. Con todo, la sedimentación natural en el océano profundo es tan lenta (del orden de un milímetro cada 1000 años) que la menor cantidad de sedimento emitido por un recolector podría ahogar la vida del fondo marino a distancias incluso mayores. La compactación del suelo es otra fuente de preocupación. Al respecto, los estudios de las tormentas abisales que levantan sedimentos del fondo oceánico profundo podrían resultar de utilidad.

El efecto de los sedimentos emitidos por el barco en la ecología y el medio oceánico no es fácil de estimar. Las corrientes oceánicas superiores son más rápidas y turbulentas, y la manguera de descarga podría penetrar centenares de metros en el agua. El penacho de sedimentos adquiriría una forma cónica de decenas de metros que las corrientes diluirían, retorcerían y transportarían a una velocidad de varios kilómetros al día. En nuestro experimento en las costas de San Diego observamos el penacho de descarga. Las corrientes oceánicas lo volvieron sinuoso y se formaron zarcillos que se entrelazaban entre sí. Sumergimos un dispositivo subacuático para tomar muestras de los zarcillos, pero necesitamos más tiempo para analizar los datos.

Mientras tanto, los investigadores intentan determinar en qué medida la pérdida de organismos vivos en una zona minera podría afectar a los sistemas biológicos locales, a las comunidades abisales adyacentes e incluso a las que se hallan a muchos kilómetros de distancia. En la ZFCC, la AIFM ha designado nueve grandes regiones protegidas y está desarrollando protocolos para establecer zonas de conservación en cada área autorizada. Los expertos observarán esas y otras zonas para analizar las repercusiones.

¿MINERÍA TERRESTRE O SUBMARINA?

Es fundamental comparar los pros y los contras ambientales de la minería en aguas profundas con los de la minería terrestre. En la República Democrática del Congo, que suministra casi el 60 por ciento del cobalto del mundo, la minería terrestre deforesta y contamina el aire y el agua, además de emplear trabajo infantil. En algunos países, las compañías dedicadas a la minería del níquel están agotando los yacimientos accesibles y empiezan a operar en otros más difíciles de explotar. Eso exige más energía y procesamiento químico.

Las plantas donde se procesarían los nódulos llevados a tierra desde las explotaciones submarinas también tendrían sus efectos. Solo el 30 por ciento de un nódulo está constituido por minerales de interés; el 70 por ciento restante son desechos, generalmente lodos. En las explotaciones mineras en tierra firme, ese tipo de residuos se suelen verter en el hueco excavado. El lodo procedente de millones de nódulos oceánicos supondrá un nuevo material que irá a parar a algún sitio. Mirando el lado positivo, los recolectores y los barcos pueden abandonar un área para desplazarse a otra, mientras que las infraestructuras mineras en superficie son difíciles de retirar.

Para reducir los efectos es crucial el reciclaje global. Pero, por sí solo, el reciclaje no basta para seguir el ritmo al crecimiento de la demanda. Hoy por hoy, resulta difícil decir si la minería marina será más o menos positiva para el entorno que un grado equivalente de minería terrestre.

El resultado también dependerá de las normativas. La AIFM regula más de la mitad del fondo oceánico del planeta en aguas internacionales, conocidas como «el Área». La AIFM, sin barcos para inspeccionar las operaciones, ha compartido su responsabilidad con las naciones. Podría revocar el permiso de un país o una compañía, suspender las operaciones o imponer una multa si se determina que la explotación de una región infringe las normas ambientales.

Catorce Estados han firmado la UNCLOS pero no la han ratificado (EE.UU. entre ellos), y 15 no la han firmado. Esas 29 naciones podrían tratar de explotar recursos minerales en aguas internacionales y violar los estatutos de la AIMF, que debería apelar a la política internacional para solucionarlo.

La organización ha publicado algunos proyectos de reglamentación de explotaciones mineras en el Área, con la intención de abarcar todos los aspectos. Espera contar con toda la normativa para 2020. Los países deberán redactar la regulación de sus instalaciones terrestres de procesado de nódulos.

Las aguas territoriales abarcan más de un tercio de los océanos. Algunos países no disponen de «mares profundos» a menos de 200 millas náuticas de la costa. Pero otros sí, sobre todo las naciones isla del Pacífico. Algunas, como Palau, se han negado a que se explote el fondo oceánico. Otras, como Tonga, Kiribati y las islas Cook, crean normas mientras buscan aliados industriales. Las islas Cook han firmado un contrato con Ocean Minerals, de EE.UU., que concede a la compañía prioridad para la prospección de 23.000 kilómetros cuadrados de sus aguas en busca de nódulos ricos en cobalto.

Estas actuaciones demuestran que la explotación del fondo marino está lista para convertirse en realidad. Algunas naciones podrían iniciar explotaciones tentativas en los próximos 5 o 10 años. Como decíamos, Japón ya ha empezado.

Lo provechoso será que las partes interesadas cooperen, como han hecho hasta ahora. Los ensayos industriales a pequeña escala deben acompañarse de la necesaria investigación científica. Gran parte de nuestro conocimiento sobre la ZFCC procede de estudios realizados con empresas. Nuestra expedición desde San Diego era un programa conjunto financiado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts y el Instituto Scripps de Oceanografía, en colaboración con la AIFM, el Servicio Geológico de EE.UU. y la compañía GSR. En 2019, el programa europeo JPI Oceans llevará a cabo un estudio junto con la AIFM y GSR en la FZCC.

Así como ciertas directrices y normativas de las operaciones comerciales podrán tomarse prestadas de las industrias existentes, otras serán nuevas. Si las partes interesadas siguen colaborando, la explotación minera del fondo oceánico establecerá un parangón. Hasta ahora, las regulaciones siempre han ido a la zaga de la extracción industrial, obligando a reaccionar a organismos y ciudadanos. Pero, como afirma Conn Nugent, de Pew Charitable Trusts, «existe la oportunidad de redactar una normativa que regule la extracción antes de que comience». IyC

PARA SABER MÁS

Biodiversity, species ranges, and gene flow in the abyssal Pacific nodule province: Predicting and managing the impacts of deep seabed mining. Estudio técnico n.º 3 de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos. Autoridad Internacional de los Fondos Marinos, 2008.

Autoridad Internacional de los Fondos Marinos: **www.isa.org.jm**

Experimentos con Penachos de Sedimentos del Instituto Scripps de Oceanografía: **www.mod.ucsd.edu/plumex**

EN NUESTRO ARCHIVO

El fondo esquilmado. Lucas Laursen en *IyC*, septiembre de 2014.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Despegues en caliente

Al modificar las condiciones del despegue, una temperatura inusualmente elevada puede perturbar el funcionamiento de un aeropuerto. El cambio climático aumentará el riesgo de que se produzcan tales situaciones

En junio de 2017, American Airlines canceló 40 vuelos con origen en Phoenix, Arizona. La prensa habló de una temperatura excesiva, de un aire menos denso y de una sustentación reducida en las alas, lo que imponía una distancia de despegue superior a la longitud de la pista.

Pero ¿ocurre realmente así? La explicación suscita nuestra incredulidad y la de no pocos colegas. Para saber a qué atenernos, hemos profundizado en la cuestión con las herramientas que nos proporciona la física. Nuestras estimaciones no tienen en cuenta por completo los valores elegidos por los fabricantes por cuestiones de seguridad, pero confirman las explicaciones ofrecidas. Y los efectos del cambio climático no se detendrán ahí: también habremos de esperar fluctuaciones más frecuentes en los tiempos de vuelo debidas a las alteraciones de la corriente en chorro.

Alzar el vuelo

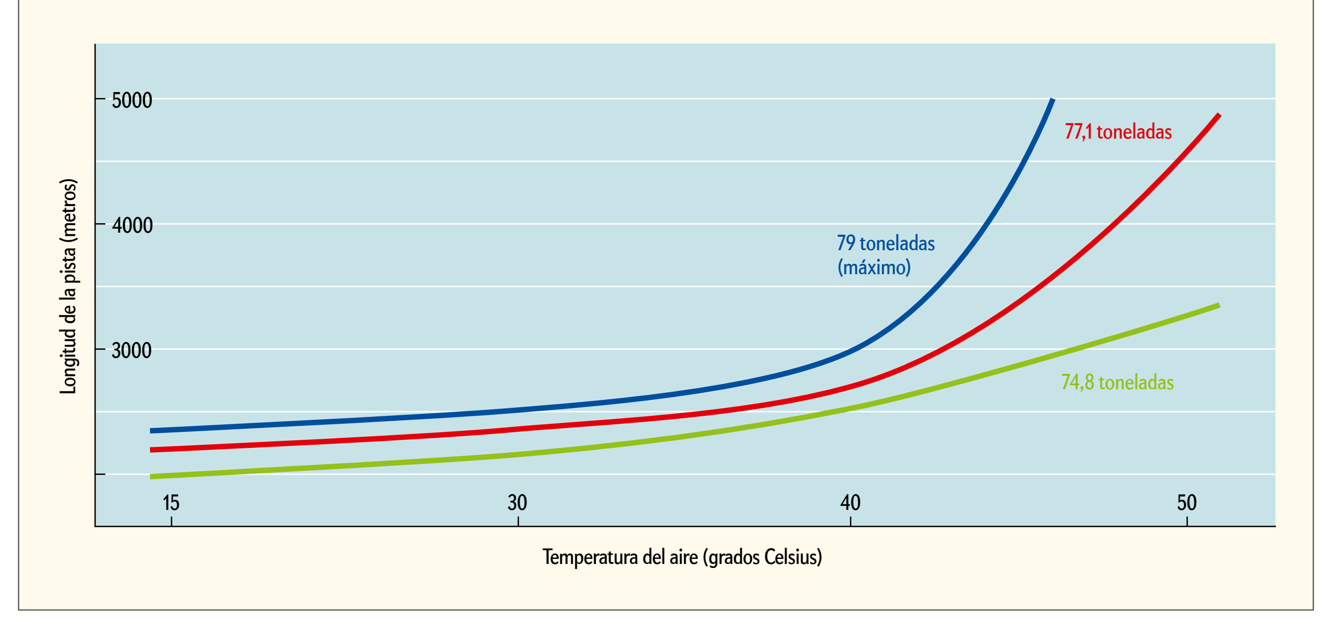
Sigamos el despegue de un avión. Una vez liberados los frenos, la aeronave rueda por la pista acelerando. El movimiento del aire en torno a las alas y al fuselaje crea una fuerza aerodinámica proporcional a la densidad del aire y al cuadrado de la velocidad del avión con respecto a dicho aire, lo que en un avión que acelera implica una fuerza cada vez mayor. Su componente horizontal, la resistencia aerodinámica, se opone a la velocidad; la componente vertical, la sustentación, compensa progresivamente el peso de la máquina.

En cierto momento, el avión alcanza la velocidad que en principio le permitiría

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON DE BRUNO VACARO

LONGITUD DE PISTA Y TEMPERATURA

LA DENSIDAD DEL AIRE disminuye con la temperatura, por lo que un aire más caliente reduce la fuerza de sustentación que eleva al avión. Como consecuencia, la aeronave necesitará alcanzar una velocidad mayor para despegar y, por tanto, requerirá una pista más larga. Esta gráfica, extraída a partir de los datos del fabricante, muestra cuál debe ser la longitud de la pista para un Boeing 737-800 en función de la temperatura del aire y para tres valores distintos de la masa total del avión.



despegar. No obstante, el piloto impide que la aeronave alce el vuelo en ese instante y continúa aumentando su velocidad: un margen de seguridad que se logra ajustando los flaps, situados en el borde de escape del aire.

¿Puede alcanzarse siempre la velocidad necesaria en una pista dada? Por razones de seguridad, se exige que la longitud de la pista sea mayor que 1,15 veces la necesaria para que el avión se eleve a 10 metros sobre el suelo. Los datos de los fabricantes indican que hace falta una pista de 2500 metros para que un avión de autonomía media, como el Boeing 737-800, despegue con plena carga (79 toneladas, de las que 37,5 son de combustible y cargamento, contando con unos 180 pasajeros) a nivel del mar y con una temperatura estándar de 15 grados Celsius. En tal caso, la velocidad típica alcanzada es de unos 250 kilómetros por hora. (A su vez, la velocidad de despegue y la carga están limitadas por la velocidad máxima que pueden soportar los neumáticos de la aeronave.)

Si la pista es más corta, solo queda la posibilidad de aligerar la aeronave: con 2133 metros, ese mismo Boeing no echará a volar a menos que la carga descienda hasta las 75 toneladas. ¿Cuál podría ser entonces el problema en el aeropuerto de Phoenix, cuya pista medía 3500 metros?

La presión atmosférica en Phoenix, situada a 340 metros de altitud, asciende al 96 por ciento de la presión a nivel del mar en condiciones estándar. Además, un pico térmico de 40 grados Celsius corresponde a un aumento del 8 por ciento en la temperatura (expresada en kelvin). Si el aire se comporta como un gas ideal, su densidad resultará proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura, nuevamente expresada en kelvin. Así pues, durante un pico de calor en Phoenix, la densidad del aire —y, por tanto, la sustentación— se reducen cerca de un 12 por ciento. Eso implica que, para despegar, la nave requerirá una velocidad en torno a un 6 por ciento mayor y, como consecuencia, una pista un 12 por ciento más larga para lograr la misma sustentación.

¿Alargar las pistas?

Para una distancia de despegue inicial de 2500 metros, lo anterior implica un alargamiento de 300 metros, una cifra nada despreciable. La explicación que se dio en los medios era por tanto perfectamente plausible, aunque insuficiente. No obstante, al añadir la disminución en el empuje de los motores provocada por el aumento de temperatura, así como varias cuestiones de seguridad, los datos del fabricante Boeing indican 3500 metros como distancia mínima necesaria.

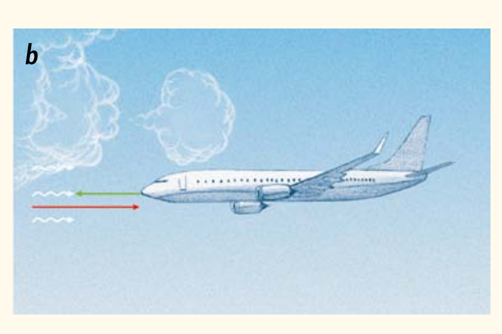
Por fortuna, la mayor parte de los aviones están equipados con aletas verticales (*winglets*) en los extremos de las alas, las cuales disminuyen la resistencia aerodinámica. Para un mismo empuje de los reactores, el avión puede así acelerar más y alcanzar la velocidad umbral al final de una distancia más corta. Eso explica por qué, al contrario que los aviones más pequeños y de menos prestaciones, los Boeing 737-800 pudieron despegar en Phoenix incluso a 52 grados Celsius y no se resintieron demasiado de la ola de calor de 2017.

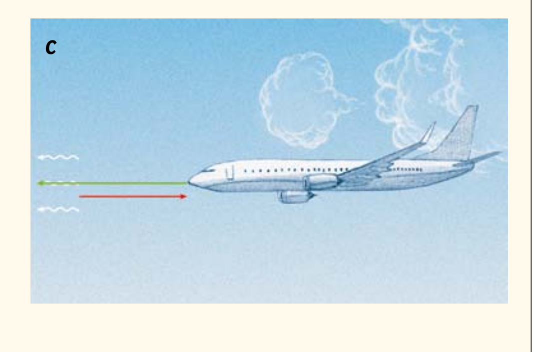
La ola de calor de Phoenix puede considerarse excepcional, pero nos pone sobre aviso. Los modelos climáticos predicen que, con el calentamiento global en curso, estos episodios caniculares se multiplicarán en todo el planeta. Por ello, un equipo de la Universidad de Columbia ha emprendido el estudio de las repercusiones que tendrá el cambio climático en el tráfico aéreo. Y aunque ciertos aeropuertos y aparatos superarán el examen

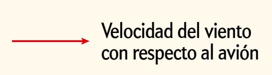
VIENTO A FAVOR O EN CONTRA

EN VUELO DE CRUCERO, la sustentación compensa el peso del avión, mientras que la resistencia aerodinámica iguala el empuje de los motores (*a*). Dado que la sustentación depende de la velocidad del avión con respecto al aire ambiente, la velocidad del aire relativa al avión (*rojo*) ha de ser la misma con o sin viento y con independencia de la velocidad de este. En presencia de un viento de proa de velocidad *v*, la aeronave deberá disminuir en un valor *v* su velocidad con respecto al suelo (*b*), mientras que habrá de aumentarla en la misma magnitud en caso de tener viento de cola. (*c*). Por tanto, y al contrario de lo que podría pensarse, el retraso que sufre un avión que vuela contra el viento no se debe a la resistencia al avance que encuentra el aparato, sino a la necesidad de frenar para conseguir que la sustentación sea igual al peso.









Velocidad del viento con respecto al avión

Velocidad del avión con respecto al suelo

Velocidad del viento con respecto al suelo

(Charles de Gaulle en París, JFK en Nueva York, los modelos A320 y A380, etcétera), otros se resentirán.

Calentamiento y tráfico aéreo

Se calcula que, en 2050, en el aeropuerto neoyorquino de La Guardia, cuya pista mide solo 2100 metros, un 737-800 deberá someterse unos 40 días al año a reducciones de 2,7 toneladas de carga máxima para poder despegar en las horas más cálidas del día. Sabiendo que, en ese avión, una reducción de 100 kilogramos se consigue retirando 83 kilogramos de carga útil y 17 de combustible, habrá que embarcar, como mínimo, 22 pasajeros menos.

¿Y durante el vuelo? ¿Qué ocurrirá si la subida de las temperaturas modifica también la densidad del aire en altitud? En este caso las consecuencias serán menores: en vuelo de crucero, a velocidad constante, la sustentación compensa el peso, y el empuje de los motores es igual a la resistencia aerodinámica. Como el cociente entre sustentación y resistencia permanece casi constante, lo mismo sucede con el cociente entre peso y empuje. La energía consumida durante el vuelo (producto del empuje por la distancia recorrida) será entonces la misma a cualquier altitud. Eso sí, el avión deberá aumentar la velocidad de crucero para compensar la disminución en la densidad del aire: los motores tendrán que suministrar más potencia, pero la duración del viaje se reducirá en proporción.

Más inquietud causan los cambios previstos en las corrientes en chorro, haces tubulares de viento que reinan entre los 8000 y los 12.000 metros de altitud, precisamente donde vuelan los aviones comerciales. Esos «ríos de aire», dos en cada hemisferio, circulan de oeste a este a una velocidad de unos 21 metros por segundo.

Con el viento en contra, la velocidad de crucero habrá de disminuir, pues las fuerzas aerodinámicas dependen del viento relativo: el estado de suspensión (sustentación igual al peso) se alcanzará a velocidades más bajas, lo que alargará el tiempo de vuelo. Cuando el viento viene de cola, sucede lo contrario.

Los pasajeros de los vuelos transatlánticos lo saben bien: entre Nueva York y Londres (5540 kilómetros), el tiempo de vuelo a 900 kilómetros por hora sería de 6 horas y 9 minutos en ausencia de la corriente en chorro. Con esta, sin embargo, se gana o se pierde en torno a media hora con respecto a dicha duración.

Los modelos climáticos prevén un aumento de unos 3 metros por segundo en la velocidad media de la corriente en chorro, así como una mayor variabilidad de esta. Aunque la repercusión media será moderada (4 minutos menos de Nueva York a Londres, 5 minutos y 20 segundos más en sentido opuesto), la probabilidad de efectuar un vuelo excepcionalmente corto (menos de 5 horas y 20 minutos) o largo (más de 7 horas) se doblará, con las consiguientes perturbaciones en el tráfico aéreo. Así pues, el viajero del siglo XXI no verá el fin de los retrasos y las cancelaciones. Y todo ello sin contar con el incremento previsto en las turbulencias atmosféricas. IyC

PARA SABER MÁS

737: Airplane characteristics for airport planning. Documento de Boeing, 2013. Disponible en **www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/acaps/737.pdf**

Transatlantic flight times and climate change. Paul D. Williams en *Environmental Research Letters*, vol. 11, art. 024008, febrero de 2016.

The impacts of rising temperatures on aircraft takeoff performance. Ethan D. Coffel, Terence R. Thompson y Radley M. Horton en *Climatic Change*, págs. 381-388, julio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Aeromotores. Mark Fischetti en *IyC*, septiembre de 2002.

El comportamiento anómalo de la corriente en chorro. Jeff Masters en *IyC*, febrero de 2015.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa ha sido reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.



El hueso de Ishango

Arqueología y voluntarismo matemático

Los artefactos prehistóricos, mudos por definición, están imbuidos de un delicioso aire de misterio. Son cautivadores, los imaginamos cargados de significado y, naturalmente, tratamos de hacerlos hablar. Pero es difícil saber si tienen algo que decir y, en tal caso, hacer que digan la verdad. [...] Todo investigador puede, fácilmente y actuando de buena fe, dejarse llevar a su pesar, ceder al canto de sirena del anacronismo con la íntima convicción de que está diciendo la verdad, porque «esto son matemáticas».

—Olivier Keller

Los arqueólogos consideran que nuestra especie apareció hace unos 200.000 años. Basándose en hallazgos como herramientas e instrumentos musicales, enterramientos funerarios, adornos corporales o arte figurativo, siguen debatiendo el advenimiento de nuestra «mente moderna». Discuten si surgió en África hace unos 100.000 años o en Europa hace apenas unos 40.000.

En particular, existen en arqueología una serie de piezas conocidas como «marcas de caza»: objetos con marcas lineales o punteadas, grabadas deliberadamente sobre piedra o hueso y consideradas como los primeros registros contables de la humanidad. Para afirmar con cierta verosimilitud que nos encontramos ante un fósil matemático, los arqueólogos buscan combinaciones, agrupaciones o patrones específicos en esas marcas. El número de ellas es crucial; en concreto, los arqueólogos consideran que las piezas que reúnen grupos de unas treinta incisiones son los candidatos más firmes. Este valor obedece a los 29,5 días que tiene un mes lunar, el período cíclico natural que, suponemos, nuestros antepasados usaban para el cómputo del tiempo.

Si aplicamos este criterio encontraremos que las primeras muestras de pensamiento protomatemático se remontan al Paleolítico superior, hace entre 35.000 y 10.000 años. Ejemplos ya clásicos de posible contabilidad rudimentaria son los huesos de Dolni Vestonice y de Lebombo, la fíbula de Gorge d'Enfer o las placas de Tai y de Mal'ta.

Pero, si hay una pieza que ha destacado entre todas las demás, esa es sin duda el célebre hueso de Ishango: un artilugio que parece ser mucho más que un palo de conteo y que en numerosas historias de la matemática se ha usado para ilustrar los primeros estadios prematemáticos de la humanidad, un signo evidente de la mente moderna.

Un hueso enigmático

En 1935, el zoólogo belga Hubert Damas descubrió en la región de Ishango, a orillas del Lago Edward, en la actual República Democrática del Congo, los restos de una comunidad de pescadores-recolectores de unos 20.000 años de antigüedad. El asentamiento quedó sepultado por una erupción volcánica y, entre los restos que se han logrado rescatar, destaca el hueso de Ishango, encontrado en 1957 por el geólogo y explorador belga Jean de Heinzelin de Braucourt.



1. EL HUESO DE ISHANGO se expone actualmente en el Real Instituto de Ciencias Naturales de Bélgica, en Bruselas, donde es presentado como «la calculadora más antigua de la humanidad».

BEN2/WIKIMEDIA COMMONS

El hueso es un peroné de babuino de 10,2 centímetros de largo que exhibe una pieza de cuarzo insertada en uno de sus extremos. Algo excepcional, ya que encontrar herramientas prehistóricas compuestas en buen estado es extremadamente raro. Los arqueólogos opinan que probablemente se trataba de una herramienta para grabar marcas.

El hueso presenta 168 incisiones transversales dispuestas en tres columnas: dos de ellas con 60 marcas y una tercera con 48. Puesto que ambos valores son múltiplos de 12, para De Heinzelin ello sugería un entendimiento de la multiplicación y la división. De hecho, fue De Heinzelin el primero en proponer una interpretación que iba más allá de un palo de conteo, la cual publicó en *Scientific American* en 1962. En ella especulaba con la idea de que se trataba de «algún tipo de juego aritmético ideado por un pueblo que tenía un sistema numérico de base diez, así como un conocimiento de la duplicación y de los números primos». ¡El artefacto matemático más antiguo del mundo!

Si desarrollamos el cilindro en el plano, podemos apreciar los detalles de las tres columnas. La primera presenta un total de 60 muescas repartidas en cuatro grupos de 19, 17, 13 y 11, respectivamente (*véase la figura 2*). Se trata, ni más ni menos, que de los números primos comprendidos entre el 10 y el 20.

En la segunda columna vemos un total de 48 marcas, las cuales parecen repartidas en ocho grupos de 7, 5, 5 (4+1), 10 (1+9), 8, 4, 6 y 3, donde los paréntesis

indican la incertidumbre de algunas agrupaciones (*véase la figura 3*). Si la leemos de derecha a izquierda, la columna comienza con 3 muescas para luego duplicar su número. Lo mismo se repite con el 4 y el 8. Después, el proceso se invierte con el número 10, el cual aparece seguido de su división por la mitad.

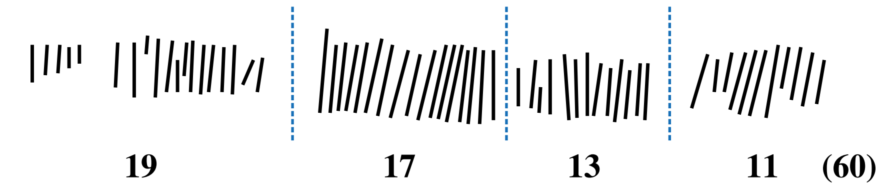
Los estudiosos han sugerido que las muescas parecen ilustrar el método de duplicación que sería empleado miles de años más tarde en la multiplicación egipcia. Para multiplicar dos números, los antiguos egipcios solo necesitaban conocer el doble o la mitad de un entero; es decir, se bastaban con nuestra tabla del dos. Por ejemplo, para calcular 35×11, los egipcios operaban (en notación moderna) del siguiente modo:

$$1 \times 35 = 35,\ 2 \times 35 = 70,\ 4 \times 35 = 140,\ 8 \times 35 = 280\,.$$

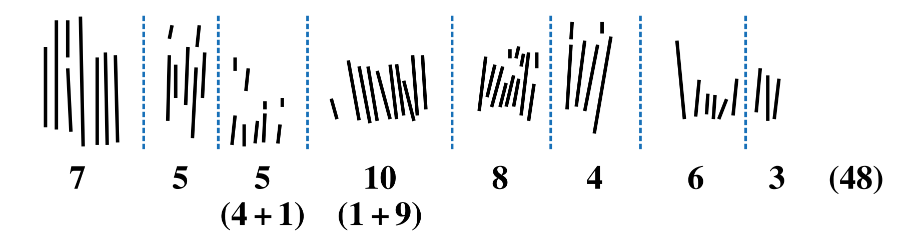
Y, puesto que $1 + 2 + 8 = 11$, tenemos que $11 \times 35 = 35 + 70 + 280 = 385$. Así pues, el hueso de Ishango puede haberse usado como herramienta para llevar a cabo operaciones matemáticas simples.

Por último, en la tercera columna observamos de nuevo 60 marcas distribuidas en cuatro grupos de 9, 19, 21 y 11 (*véase la figura 4*). Según algunos expertos, podría tratarse de la primera prueba conocida de un sistema de numeración en base diez, ya que las marcas siguen la pauta $10 + 1 = 11$, $20 + 1 = 21$, $20 - 1 = 19$ y $10 - 1 = 9$.

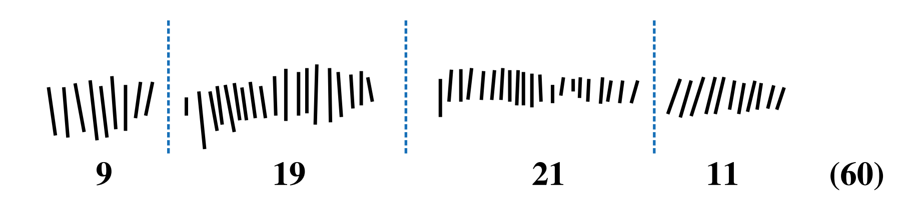
Con todo, no fueron las especulaciones de De Heinzelin las que dieron fama universal al hueso, sino las de los matemáticos Dirk Huylebrouck y Vladimir Pletser, quienes, admitiendo las premisas del maestro, concluyeron que las tres columnas conformaban una especie de regla de cálculo en cuyos detalles no entraremos aquí.



2. PRIMERA COLUMNA del hueso de Ishango. Incluye los números primos comprendidos entre el 10 y el 20.



3. SEGUNDA COLUMNA del hueso de Ishango. La sucesión de números que aparece en ella se ha relacionado con un sistema de multiplicación basado en la duplicación de enteros.



4. TERCERA COLUMNA del hueso de Ishango. Las cuatro cantidades que se muestran se obtienen sumando o restando 1 a 10 y 20, lo que algunos expertos han asociado con un sistema de numeración en base diez.

Matemática ficción

Hasta ahora hemos contado lo que podemos encontrar en la mayor parte de los textos populares al respecto, Wikipedia incluida. Pero la ciencia y las matemáticas tienen también sus mitos, sus rituales y sus héroes; sus historias «cautivadoras» e «imbuidas de un delicioso aire de misterio», como describe el investigador Olivier Keller en la cita que encabeza este artículo, frente a las cuales incluso los matemáticos pueden llegar a suspender su juicio crítico.

Si volvemos a las columnas, las implicaciones de que hace 20.000 años ya se supiese lo que era un número primo chocan con todo lo que sabemos sobre teoría de números. Resulta extraño que sean solo los primos entre 10 y 20 los que aparecen, y que además lo hagan junto a algo tan trivial como multiplicar por dos o sumar y restar uno. Pero, además, en la segunda columna hemos tenido que dejar de lado el 5 y el 7, ya que no se ajustaban a la pauta propuesta. Por último, una vez que hemos admitido que los grupos de marcas representan números, es fácil encontrar patrones como el de la tercera columna, de la que se deduce un sistema en base diez gracias a una pirueta intelectual.

Esto es algo que hemos visto hacer en numerosas ocasiones con las medidas de las pirámides de Egipto, y a lo que les animo a jugar en Internet con *The Inverse Symbolic Calculator* (ISC). Esta extraña calculadora funciona «al revés»: introducimos un número y nos devuelve la combinación aritmética de constantes físicas y matemáticas que más se aproxima a la cantidad dada.

Por supuesto, no todas las marcas tienen que ser deliberadas. Recordemos el sonado caso de la supuesta flauta neandertal de la cueva de Divje Babe, en Eslovenia: un estudio pormenorizado determinó que los dos orificios alineados que en un principio hicieron pensar en una flauta resultaron ser las incisiones de los dientes de un carnívoro. Y las marcas tampoco tienen por qué representar ningún registro contable. Por ejemplo, un conjunto de líneas paralelas puede tener un significado alegórico, como ocurre en la cultura zafimaniry de Madagascar, en la que son un recordatorio de la rectitud que hay que seguir en la vida. O pueden también representar un alfabeto, como en la escritura ogámica.

Así pues, la primera especulación que estamos haciendo es suponer que un conjunto de marcas representa un número. Y, una vez que tenemos números, ya no

es difícil caer en ilusiones matemáticas. El hueso de Ishango no es único en este sentido. Otros ejemplos famosos los hallamos en la teoría de la yarda megalítica de Alexander Thom, los sistemas numéricos prehistóricos del historiador ruso Boris Frolov, o la teoría de los biorritmos de Wilhelm Fliess, por citar algunos.

Dos explicaciones a las marcas del hueso de Ishango que resultan menos fantasiosas son las de Alexander Marshack y Claudia Zaslavsky. Marshack examinó el hueso al microscopio y concluyó que podría representar un calendario lunar de seis meses, ya que las marcas parecen simular en forma y tamaño las fases de la Luna. Por su parte, la que se conoce hoy como conjetura Zaslavsky, en honor a la historiadora de la matemática africana que la planteó, apunta a otro período cíclico natural de alrededor de 28 días: la menstruación femenina. Para esta investigadora, el hueso de Ishango sería un instrumento de contaje para este ciclo, lo que refuerza la idea de que las mujeres habrían sido las primeras matemáticas de la historia.

Se trata de nuevo de especulaciones difíciles de afirmar sin fisuras. Si ven los dibujos de Marshack entenderán lo que digo. Y la propia Claudia Zaslavsky relata que algunas mujeres africanas ocasionalmente hacen una muesca en el mango de su cuchara de madera. ¿Están marcando los días del período menstrual? No: graban una muesca cada vez que su esposo las golpea y, cuando el mango de la cuchara está lleno, piden el divorcio.

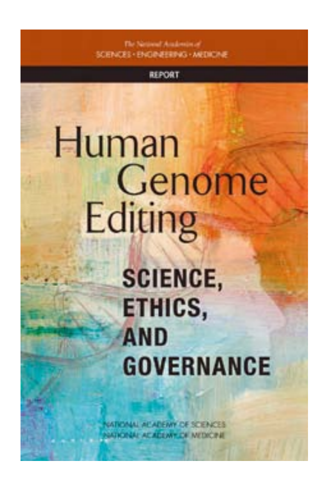
Henchido de poesía, Huylebrouck escribió esto sobre la que se considera la prolepsis (*flashforward*) más larga del cine, la de *2001: Una odisea del espacio*: «Kubrick mostró a nuestros antepasados en un paisaje prehistórico arrojando una herramienta de hueso al cielo. Gracias a los efectos especiales, el hueso gradualmente se transformaba en una nave espacial. [...] Es una metáfora para ilustrar el progreso humano, desde descubrimientos que hoy nos parecen simples hasta la tecnología espacial. [...] Desde el Neolítico apenas han sido necesarios 4000 años para que la ciencia alcanzara el espacio. Tal vez algún día un astronauta inspirado permita que el hueso de Ishango continúe el viaje de Kubrick. [...] ¿Cuáles serán las palabras adecuadas que deberemos pronunciar cuando el hueso llegue a su destino, el espacio?». Por mi parte, propongo que sean las del historiador de la matemática G. G. Joseph: «Un hueso puede colapsar bajo el peso de las conjeturas acumuladas sobre él». IyC

PARA SABER MÁS

Ishango. Jean de Hinzelin en *Scientific American*, junio de 1962.
The bone that began the space odyssey. Dirk Huylebrouck en *The Mathematical Intelligencer*, vol. 18, n.º 4, págs. 56-60, septiembre de 1996.
Prehistoria de la matemática y mente moderna: Pensamiento matemático y recursividad en el Paleolítico franco-cantábrico. Francisco A. González Redondo, Manuel Martín-Loeches y Enrique Silván Pobes en *Dynamis: Acta Hispanica ad Medicinae Scientiarumque Historiam Illustrandam*, vol. 30, pags. 167-195, febrero de 2010.
Les fables d'Ishango, ou l'irrésistible tentation de la mathématique fiction. Olivier Keller en *Bibnum: Textes fondateurs de la science*, agosto de 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

Acertijos y problemas de teoría de números suscitados por las curiosas fracciones del antiguo Egipto. Martin Gardner en *IyC*, diciembre de 1978.



HUMAN GENOME EDITING
SCIENCE, ETHICS, AND GOVERNANCE

Varios autores
National Academies Press, 2017

La edición del genoma humano

De los posibles beneficios de la técnica a las implicaciones éticas de modificar la línea germinal

Sabido es que, en la interrelación entre teoría y experimentación, la incorporación de nuevas herramientas y el refinamiento de las existentes facilitan el avance de la ciencia al plantear nuevas cuestiones y generar soluciones inesperadas. En el área de la salud y la medicina, investigadores básicos y clínicos han venido aplicando desde hace años técnicas de biología molecular para tratar o prevenir la enfermedad.

Desde su introducción hace unos cinco años, la edición genómica mediante el sistema CRISPR-Cas9 se ha convertido en herramienta clave de laboratorios del mundo entero. Para aplicar la edición genómica al ser humano, importa analizar las cuestiones científicas, éticas y sociales que plantea. Conviene también examinar la capacidad de la administración pública a la hora de asegurar un uso y un desarrollo responsables de la técnica. A imagen de lo que sucede con otros avances en medicina, a la ponderación de sus beneficios hemos de contraponer la consideración sobre sus riesgos, con atención a marcos reguladores. *Human genome editing: Science, ethics, and governance* es la respuesta dada a tales esperanzas y preocupaciones por las Academias Nacionales de Ciencia, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos.

La historia reciente de la ciencia registra pasos importantes en la elucidación del papel de la genética en enfermedades y estados muy dispares, desde la anemia falciforme o la distrofia muscular hasta la fibrosis quística, la sordera o la ceguera. Unos resultan de la mutación de un gen, pero la mayoría implican una compleja interrelación entre factores genéticos y ambientales. En todo caso, la investigación no cesa de progresar. Acaba de descubrirse, por ejemplo, que la mutación de la anemia falciforme surgió hace unos 7300 años para, más tarde, diferenciarse el alelo ancestral en diversos haplotipos.

Las herramientas que permiten a los investigadores alterar las secuencias de ADN para entender o mejorar su función no son nuevas. Sin embargo, en años recientes hemos asistido a una eclosión de técnicas de edición genómica que permiten cambios más fáciles, mejor controlados y más precisos del ADN. Esas medidas se basan en enzimas exógenas que cortan el ADN por lugares predeterminados, combinadas con procesos endógenos que reparan el ADN roto, lo que facilita que se añadan letras al genoma o bien que se modifiquen o eliminen algunas de las existentes.

Las secuencias genéticas dibujan solo una parte del cuadro biológico. Queda mucho por descifrar sobre cómo y cuándo se activan e inactivan los genes y sobre el papel del epigenoma. La expresión génica controlada y las alteraciones epigenéticas repercuten en el modo en que los tejidos se desarrollan y se diferencian, y presentan ramificaciones en otros ámbitos, como la oncología y la embriología.

Desde hace decenios, la comunidad científica venía cubriendo etapas en investigación genética que se prometían transformadoras de la sociedad: la técnica del ADN recombinante, la investigación sobre células madre embrionarias, la clonación humana y, por fin, el advenimiento de la edición genómica, una herramienta novedosa y muy potente. (La expresión edición genómica es más amplia que la de edición génica: la edición puede afectar a segmentos de la secuencia que no formen parte de gen alguno, como las zonas que regulan la expresión génica.)

Los nuevos métodos se apoyaron en el reconocimiento proteico de secuencias de ADN específicas, meganucleasas, nucleasas de dedos de zinc (ZFN), nucleasas efectoras de tipo activador de transcripción (TALEN) y, en fecha más reciente, el sistema CRISPR-Cas9. Este sistema de edición genómica ha constituido una bendición para los investigadores, al permitirles manipular un extenso elenco de genomas con rapidez y precisión.

Las primeras publicaciones al respecto, aparecidas en 2012 y 2013, explicaban que el sistema CRISPR-Cas9, derivado de un mecanismo bacteriano de defensa contra la infección vírica, podía domeñarse para controlar cambios genéticos en cualquier ADN, incluido el humano [*véase* «El descubrimiento del sistema CRISPR-Cas», por Francisco J. M. Mojica y Cristóbal Almendros; Investigación y Ciencia, octubre de 2017]. Esta nueva herramienta se ha venido empleando con gran precisión para la edición del ADN y en multitud de otras aplicaciones. La investigación tampoco cesa en este terreno: se ha acotado cierta variante de Cas9 sumamente precisa que demuestra una altísima especificidad a lo largo del genoma sin comprometer la actividad celular. Otro ejemplo es la modificación denominada «CRISPR arcoíris», un sistema que marca con suma facilidad múltiples *loci* genómicos de las células.

Hace poco se comprobó que el sistema CRISPR-Cas9 podía hacer algo más que servir de mecanismo de defensa frente a fagos invasores en su entorno bacteriano nativo. Trabajando con *E. coli* se ha observado que dicho sistema podría acelerar la evolución de algunos microorganismos. Bacterias y bacteriófagos se dotan de mecanismos de defensa y ataque para proteger su propio genoma y degradar el ajeno. El sistema CRISPR-Cas es un mecanismo de defensa bacteriano que reconoce breves secuencias del genoma del fago invasor y lo destruye con el ataque de una nucleasa. Los investigadores Pan Tao y sus colaboradores descubrieron que el sistema CRISPR-Cas podía acelerar también la evolución del fago. Ello podría constituir una espada de doble filo que aportara ventajas a la supervivencia de bacterias y fagos, induciendo su coevolución y abundancia sobre la Tierra.

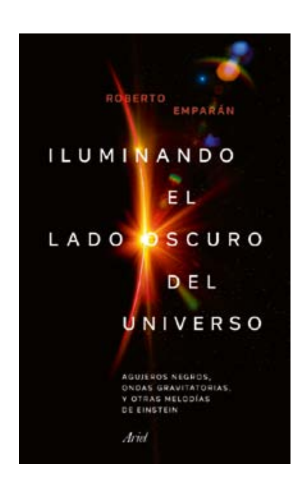
En líneas generales, la edición genómica puede aplicarse a dos objetivos muy amplios: intervenciones somáticas e intervenciones de la línea germinal. La investigación básica puede centrarse en los mecanismos celulares, moleculares, bioquímicos, genéticos o inmunológicos, in-

cluidos los que afectan a la reproducción y al desarrollo de la enfermedad, así como en las respuestas al tratamiento. En su mayor parte, la investigación básica sobre células humanas utiliza células somáticas; es decir tipos celulares no relacionados con la reproducción (células de la piel, hígado, pulmón, etcétera). Sin embargo, hay también trabajos que utilizan células de la línea germinal: embriones tempranos, óvulos, espermatozoides y células que dan origen a óvulos y espermatozoides. Estos casos entrañan consideraciones éticas y reguladoras a propósito de la forma en que se recaban tales células y los fines que persigue la investigación básica [*véanse* «La cumbre sobre edición genética en humanos concluye con opiniones divergentes», por Sara Reardon, Investigación y Ciencia, febrero de 2016; *y* «Edición genética de embriones humanos», por Nerges Winblad y Fredrik Lanner, Investigación y Ciencia, octubre de 2017].

A diferencia de la investigación básica, la investigación clínica se refiere a las intervenciones en humanos. En los países que poseen regulaciones complejas al respecto, las posibles aplicaciones deben pasar una fase de investigación supervisada antes de ponerlas al alcance de los pacientes. Las aplicaciones clínicas de la edición genómica que afectan a las células somáticas condicionan solo al paciente, lo mismo que cualquier otra terapia a la que se someta; no repercuten en la progenie. En cambio, las intervenciones en la línea germinal se proponen alterar el genoma, de suerte que afectaría no solo al hijo engendrado, sino también a sus descendientes.

La edición genómica fue nombrada método del año 2011 por la revista *Nature Methods*. En particular, el sistema CRISPR-Cas9 de edición genómica fue reconocido como hito del año en 2015 por *Science*. Esta técnica ha despertado el interés de científicos de todo el mundo en razón de su influencia directa sobre procesos biológicos fundamentales y sobre la salud y el bienestar humanos. Una promoción que, como en otras ocasiones de la historia de la ciencia, no va exenta de objeciones graves ante posibles repercusiones en lo concerniente a enfermedades, condicionamiento de la progenie y profundización en las diferencias sociales.

—Luis Alonso



ILUMINANDO EL LADO OSCURO DEL UNIVERSO
AGUJEROS NEGROS, ONDAS GRAVITATORIAS Y OTRAS MELODÍAS DE EINSTEIN
Roberto Emparán
Ariel, 2018

Iluminando el lado oscuro de la divulgación científica

Relatividad general y ondas gravitacionales sin metáforas engañosas

La primera detección directa de ondas gravitatorias, en 2015, fue justamente aclamada —en medio de titulares sensacionalistas sobre las predicciones de Einstein y la «confirmación definitiva» de su teoría de la relatividad general— como uno de los hitos científicos de nuestra época. Se puede comparar a haber descubierto las ondas hertzianas (con sus múltiples manifestaciones, como los rayos X, gamma, láser o la radiación de microondas, por ejemplo) sin haber visto antes la luz. O, en un plano más místico, a la apertura de un «tercer ojo» que nos permite acceder a otro plano de la realidad. Como al ciego de nacimiento que de repente ve por primera vez, han empezado a llegarnos imágenes de cosas que aún no entendemos. Estamos asombrados, y ese asombro no hará más que crecer conforme vayamos reconociendo y descubriendo los fenómenos que generan esas imágenes.

Un evento de esta trascendencia demanda una explicación para el gran público que desbroce el hecho científico de toda la mitología que rodea a cualquier cuestión que tenga que ver con Einstein, Stephen Hawking o los agujeros negros. Sin embargo, y salvo excepciones, la divulgación científica en español es terreno de aficionados bienintencionados (blogueros, *youtubers*), cuya labor, positiva en general y a veces más que digna, carece a menudo de la solidez necesaria para abordar ciertos temas en profundidad y responder correctamente a las preguntas de los seguidores sin recurrir a simplificaciones que desvirtúan el contenido. Hay muy pocos libros escritos por auténticos expertos en la materia, y los que llegan al gran público son, en general, traducciones del inglés de cuya calidad podríamos hablar otro día.

El libro que nos ocupa está escrito por un gran experto en la gravedad. Y justo por eso, así como por su calidad y por lo oportuno de su publicación, es una rareza y una pequeña joya que, por un lado, va a satisfacer la curiosidad de una sociedad cada vez más educada, y, por otro, subraya la vitalidad —o resiliencia— y el nivel actual de nuestra ciencia *malgré tout*. Sobre la gravedad no es solo que hubiera pocos libros autóctonos, y menos aún escritos por expertos, sino que alguno de ellos (de un famoso catedrático cuyo nombre, incomprensiblemente, su universidad reivindica ahora) estaba incluso dedicado a explicar por qué la teoría de la relatividad era errónea, cayendo de lleno su autor en uno de los tipos de investigador fracasado clasificados por Ramón y Cajal.

Roberto Emparan, profesor de investigación ICREA en la Universidad de Barcelona y actualmente galardonado con una prestigiosa beca Advanced Grant del Consejo Europeo de Investigación, es uno de nuestros mayores expertos en gravedad. En líneas generales —es mucho y muy diverso lo que ha hecho— se puede decir que su trabajo se ha dirigido a entender los aspectos clásicos y cuánticos de la gravedad a partir de teorías formuladas en más de cuatro dimensiones espaciotemporales. Así, por ejemplo, ha trabajado en la interpretación microscópica de la entropía de Bekenstein-Hawking de ciertos agujeros negros utilizando la teoría de cuerdas; aunque quizás su resultado más conocido sea la construcción matemática, junto con Harvey Reall, de «anillos negros»: agujeros negros en cinco dimensiones con horizontes de sucesos con la topología de una

rosquilla. Estos objetos violan varias de las propiedades de los agujeros negros en cuatro dimensiones (unicidad, topología) y su descubrimiento abrió las puertas a una comprensión más profunda de este tipo de objetos [*véase* «Anillos negros», por Roberto Emparan; Investigación y Ciencia, agosto de 2006].

Aunque el libro solo trata de los aspectos clásicos y más consolidados de la teoría de la relatividad general de Einstein, y a un nivel divulgativo muy logrado, el conocimiento casi íntimo del tema por parte del autor impregna todo el texto: la explicación y el uso de unidades geometrizadas para el tiempo y otras magnitudes; los ejemplos elegidos para ilustrar el concepto de simultaneidad y las deformaciones del espacio y del tiempo; los cálculos simples pero rigurosos de los suplementos, etcétera. Es un placer leer un libro que habla de algo asombroso e inspirador de forma sencilla y amena sin necesidad de hacer uso de exageraciones y metáforas engañosas (aunque mi gusto difiera de el del autor en cuanto a comparaciones musicales y poéticas).

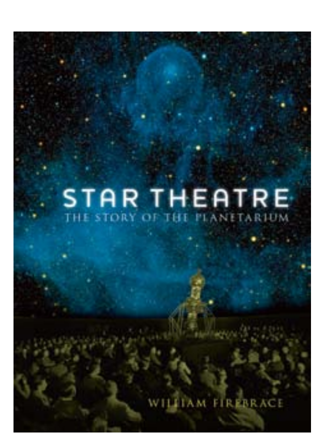
La obra recorre en dos partes bien diferenciadas la historia de la formulación de la teoría general de la relatividad por Einstein y sus primeros éxitos y predicciones, y la del desarrollo de los detectores de ondas gravitatorias. Les sigue una línea del tiempo que se lee de corrido y que resume la historia que nos lleva al evento GW150914, la primera onda gravitatoria detectada, así como una serie de suplementos y referencias muy bien elegidas que permitirán al lector interesado ampliar su conocimiento.

En la primera parte seguimos los pasos del joven (y no tan joven) Einstein y descubrimos con él que era necesaria una nueva forma de entender la interacción gravitatoria. Esta historia, que es sin duda una de las aventuras intelectuales más apasionantes de la humanidad, es la excusa para presentarnos la relatividad general y sus conceptos fundamentales hasta llegar a sus predicciones más radicales: los agujeros negros, las ondas gravitatorias y el uso de la teoría para tratar, por primera vez de forma científica, el universo en su conjunto. Es imposible concluir esta parte sin rendirse al mito de Einstein, uno de los pocos hombres que, como subraya el autor, hizo de la observación de algo cotidiano la piedra angular de una nueva concepción del mundo.

La segunda parte, centrada en explicarnos cómo se han podido detectar las ondas gravitatorias predichas por la relatividad general, está también presentada de forma histórica. Entender la técnica empleada (interferometría) y otros detalles (la necesidad de más de un detector, la magnitud del efecto que se observa, conocer de antemano la «melodía» que se quiere reconocer, etcétera) nos lleva a recorrer ámbitos bastante diferentes de la física [*véase* «La observación de ondas gravitacionales con LIGO», por Alicia Sintes y Borja Sorazu; Investigación y Ciencia, febrero de 2017]. Si el libro está muy bien documentado en general, esta parte destaca en ese aspecto.

En resumen, se trata de una obra que deberían leer todos aquellos que deseen estar al tanto de los inicios de la revolución científica que, sin duda, va a seguir a la apertura de este nuevo «tercer ojo», y entenderlo de forma básica y amena a la vez que rigurosa. Y en esta ocasión no hace falta esperar a que se publique su traducción... salvo aquellos que no entiendan el español.

—Tomás Ortín Miguel
Instituto de Física Teórica
Universidad Autónoma de Madrid/CSIC



STAR THEATRE
THE STORY OF THE PLANETARIUM
William Firebrace
Reaktion, 2018

Los planetarios y el nacimiento de la ciencia como espectáculo

Una historia cultural de los teatros de estrellas que nos acercan el cosmos

Visitar un planetario de niño puede convertirse en un momento crucial, señala William Firebrace al comienzo de *Star theatre*. Estos edificios que intentan mostrarnos el cosmos constituyen a menudo nuestra primera experiencia de la interacción entre ciencia y entretenimiento. *Star theatre* es una historia más cultural que científica, pero gira inevitablemente alrededor de la comunicación de la ciencia. Ofrece una visión fascinante sobre cómo, a lo largo del siglo pasado, la astronomía evolucionó a través de los planetarios desde una herramienta para la educación y el desarrollo personal hasta un espectáculo de multitudes.

Firebrace, arquitecto y escritor, ubica los orígenes espirituales del planetario en el antiguo Egipto, donde se pensaba que el cuerpo tachonado de estrellas de Nut, diosa del cielo, se arqueaba sobre el valle del Nilo. También los modelos cósmicos gozan de una prehistoria tecnológica sorprendentemente larga: relojes astronómicos, enormes globos celestes giratorios y planetarios mecánicos gigantes, muchos de ellos asombrosamente complejos. A finales del siglo xviii, el cardador de lana holandés y astrónomo aficionado Eise Eisinga construyó un elaborado modelo mecánico del sistema solar en su sala de estar, aunque el espacio resultó ser demasiado pequeño para dar cabida al recién descubierto Urano (la esposa de Eisinga, Pietje, insistió en que el mecanismo incluyera espacio para almacenar la ropa y la vajilla).

El planetario moderno, una cúpula sobre la que se proyecta un simulacro del cielo nocturno, constituye un invento más reciente. El prototipo se gestó en el tejado de la fábrica de instrumentos ópticos de Carl Zeiss en Jena, Alemania, en 1924, ideado por el ingeniero Walther Bauersfeld. Conocido como *Sternentheater*, o «teatro de las estrellas», la estructura empleó un diseño innovador: un proyector central con varias lentes y una cúpula geodésica ligera.

Aquello llegó en un momento emocionante para la física y la astronomía. La teoría general de la relatividad de Eins-

tein y el descubrimiento de otras galaxias más allá de la Vía Láctea por parte de Edwin Hubble aún estaban frescos en la memoria de la gente. Otros avances estaban al caer, incluidas las pruebas de la expansión del universo (de nuevo por Hubble), las primeras incursiones de Karl Jansky en el campo de la radioastronomía o la detección de Plutón por Clyde Tombaugh.

El concepto del planetario también encajaba con los movimientos sociales y políticos de la época. En la República de Weimar de la Alemania de entreguerras, estos giraban sobre la fuerza civilizadora del arte, el diseño y la ciencia a disposición del público. Por desgracia, la Segunda Guerra Mundial destruyó muchos planetarios de esta primera ola alemana, que tomó elementos arquitectónicos del neoclasicismo y la Bauhaus.

El planetario constructivista de Moscú, erigido en 1929, combinó un espíritu proletario con una ingeniería revolucionaria: una cúpula paraboloide de hormigón armado. Durante la Guerra Fría, el edificio volvió a ser relevante como escaparate de los triunfos que la Unión Soviética cosechó en el espacio. Además de fomentar la idea igualitaria de la exploración espacial como destino del pueblo soviético, se usó para familiarizar a los cosmonautas con las constelaciones y con los entresijos del sistema solar.

La rivalidad entre superpotencias tras la Segunda Guerra Mundial demostró ser un terreno fértil para una nueva ola de planetarios, donde los edificios desempeñaron de nuevo un rol ideológico. En EE.UU., los financiaron sobre todo los plutócratas. Sus edificios, a menudo excéntricos, se inspiraron en la estética exuberante de las revistas baratas de ciencia ficción. Como señala Firebrace, la ciencia popular en EE.UU. estaba vinculada «al entretenimiento de masas, la aventura, la exploración y los encuentros individuales con lo desconocido».

Se dice que el banquero y filántropo Charles Hayden creía que «sentir la inmensidad del cielo y nuestra propia pequeñez» debía estar al alcance de todos, si bien Firebrace señala con ironía que la sensación de tamaño también podía depender del estatus socioeconómico. El planetario de 1935 que se construyó en Nueva York con el nombre de Hayden tenía lámparas con la forma de Saturno y fue coronado con una cúpula de bronce que, gracias a su insonorización, creaba la ilusión de aislamiento en el espacio.

El Reino Unido llegó relativamente tarde: el icónico Planetario de Londres no abrió sus puertas hasta 1958. Construido en un estilo que Firebrace describe como «modesto y recatado», fue adosado al museo de cera Madame Tussauds: una combinación chocante que apenas resulta un poco menos extraña cuando uno recuerda que ambos atañían al negocio de la simulación (aquel planetario dejaría de funcionar como tal en 2006).

Nuestra era de telescopios espaciales y sondas robóticas ha coincidido con una revolución en la tecnología de los planetarios. Los asistentes ya no están atados a un punto de observación fijo en la Tierra: ahora pueden volar virtualmente a través del sistema solar y más allá gracias a una impecable mezcla de imágenes reales y generadas por ordenador, las cuales son proyectadas por sistemas digitales.

Firebrace lamenta que se haya perdido la sutileza de las proyecciones tradicionales, pero los grandes espectáculos espaciales modernos han ayudado a renovar el interés del público por todo lo relacionado con la astronomía. Tal vez sea su parecido con el cine y los videojuegos lo que les haya permitido prosperar, en un momento en el que los museos se ven en problemas para atraer a las audiencias más jóvenes. Y podría defenderse que el planetario moderno constituye una vía muy efectiva para alcanzar una implicación más profunda con la ciencia.

Hoy sabemos que gran parte del cosmos es invisible y que nuestros métodos para investigarlo ya no dependen por completo de la radiación electromagnética. En este sentido, *Star theatre* finaliza cuestionando el papel futuro del planetario —una experiencia basada en la luz visible— para representar un universo de ondas gravitacionales, materia oscura y energía oscura. Pero no parece probable que esta combinación ganadora de drama, tecnología, diseño y ciencia pase de moda a corto plazo. Como concluye Firebrace: «Los cielos están tan llenos de luz como de costumbre».

—Marek Kukula
Real Observatorio de Greenwich
Londres

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 552, págs. 172-173, 12 de diciembre de 2017.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2018

Con la colaboración de nature

NOVEDADES



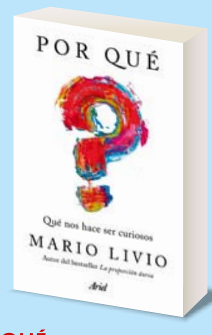
CIENCIA, Y YO QUIERO SER CIENTÍFICO

Varios autores
Prólogo de Federico Mayor Zaragoza y Federico Mayor Menéndez
Editado por Quintín Garrido Garrido
425 págs.
Disponible gratuitamente en cienciayyoquierosercientifico.blogspot.com.es



L'IMPERI DE LES DADES
EL BIG DATA: OPORTUNITAT I AMENACES

Xavier Duran
Pub. Universitat de València, 2018
ISBN: 978-84-9134-288-5
232 págs. (19,95 €)
Premio Europeo de Divulgación Científica Estudio General 2017



POR QUÉ
QUÉ NOS HACE SER CURIOSOS

Mario Livio
Ariel, 2018
ISBN: 978-84-344-2757-0
272 págs. (19,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

JULIO

1968

Unidades de ataques cardíacos

«El desarrollo de unidades de cuidados coronarios promete un cambio profundo en el tratamiento de las coronariopatías. Esas instalaciones hospitalarias, aunque pequeñas y modestas, rara vez con más de ocho camas, constituyen una importantísima innovación terapéutica para afrontar la desorbitada mortalidad de los ataques cardíacos. Cada año, más de 1,5 millones de estadounidenses sufren ataques coronarios, y de ellos fallecen unos 600.000. Una persona que sufra un ataque cardíaco, si es llevada a un hospital carente de unidad de cuidados coronarios no tiene hoy más probabilidades de sobrevivir que una persona en las mismas circunstancias hace treinta años.»

Cristalografía de rayos X

«En los últimos años se ha llegado a una culminación con el éxito del análisis estructural de varias proteínas, las moléculas básicas de la materia viviente constituidas cada una por miles de átomos que se mantienen unidos merced a una red de enlaces químicos increíblemente intrincada. El éxito más reciente se ha conseguido con la hemoglobina (por [Max Ferdinand] Perutz), cuyo modelo contiene 10.000 átomos. Confieso que, al contemplar uno de esos modelos, aún me cuesta creer que haya sido posible desvelar todos sus detalles mediante la óptica subyacente al análisis por rayos X, que hace medio siglo reclamó el cloruro de sodio como su primer logro. —Sir Lawrence Bragg»

Bragg compartió el premio Nobel de física de 1915 con su padre, William Henry Bragg, por la cristalografía de rayos X.

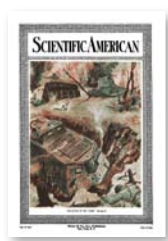
1918

La sorpresa de octubre

«La enorme concentración de fuego en el frente occidental nos recuerda la abyecta traición de Trotzky [sic] y Lenine [sic], cuando esos agentes alemanes dijeron a los sencillos soldados campesinos rusos que abandonaran las líneas, pues la guerra había terminado. Así lo hicieron, dejando tras ellos, a lo largo de más mil kilómetros de frente ruso, nadie sabe cuántos miles de armas, ligeras y pesadas. Esas armas se encuentran ahora en el frente occidental, cobrándose un alto precio en vidas francesas, británicas y americanas. Esos dos agentes consiguieron, asimismo, entregar a Alemania toda una flota de buques de guerra, muchos de ellos de los tipos más modernos y eficaces, pero no sabemos hasta qué punto esos enloquecidos revolucionarios habrán dejado deteriorarse una flota fuera de servicio.



1968



1918



1868

1868

Avenamientos

«El desecado de terrenos pantanosos no es una idea nueva. El bombeo, el zanjeado y la construcción de canales y diques son eficaces solo en parte. El agua se infiltra a través de esas defensas artificiales, cuya integridad sucumbe a ratas y cangrejos de río. Los canales de hierro, invención del señor S. B. Driggs, de Nueva York, parecen oponer una barrera efectiva al avance de tan destructivos agentes. Esos canales se construyen incrustando en el suelo planchas de hierro que se unen por los bordes. El peso de los operarios o algunos golpes con piedras en la cara vista bastan en el caso de suelos muy barrosos, mientras que para tepes duros y rígidos se recurre a la operación conocida como escopleado (*véase la ilustración*).



1868: En Nueva Jersey, dos operarios instalan planchas de hierro por «escopleado» del terreno para facilitar el avenamiento del mismo.

El maravilloso cerebro de Phineas Gage

«Hace casi veinte años, las revistas médicas del mundo dejaban constancia del singularísimo caso de un trabajador de Cavendish (Vermont) a quien, al realizar una voladura, un hierro de apisonar le atravesó la cabeza de parte a parte, y que se recuperó de hecho al cabo de sesenta días. Tan sorprendente e inaudito resultado fue recibido con incredulidad, con un gran número de médicos ilustres calificándolo de físicamente imposible, pero la consiguiente presentación en público de la misma persona convenció a los más escépticos, y respaldó el primer informe del doctor John M. Harlow, el médico que lo atendió y publicó el caso. En una muy reciente reunión de la Sociedad Médica de Massachusetts, dicho caballero leyó una comunicación con la historia clínica y presentó el auténtico cráneo objeto de la lesión. El estado general de salud del accidentado parece que fue bueno hasta 1859. Sufrió ataques de epilepsia que finalmente le causaron la muerte en mayo de 1861, casi trece años después del accidente. La lesión debió de provocar el desequilibrio entre las facultades intelectuales del individuo y sus propensiones animales: se convirtió en caprichoso, variable, irreverente, vacilante, incomedido; una mente infantil con un aspecto físico y pasiones de adulto.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XIX, N.º 5, 29 DE JULIO DE 1968

ASTRONOMÍA

La vida secreta del Sol

Rebecca Boyle

Nuestra estrella más cercana tiene una biografía mucho más emocionante de lo que suponían los científicos. Nuevas investigaciones iluminan el pasado y el posible futuro del Sol.



BIOLOGÍA DEL DESARROLLO

Nuevos conocimientos sobre la placenta

Adrian Erlebacher y Susan J. Fischer

Los estudios recientes indican que este órgano hace mucho más que transportar oxígeno y nutrientes al feto y eliminar los desechos y el dióxido de carbono.

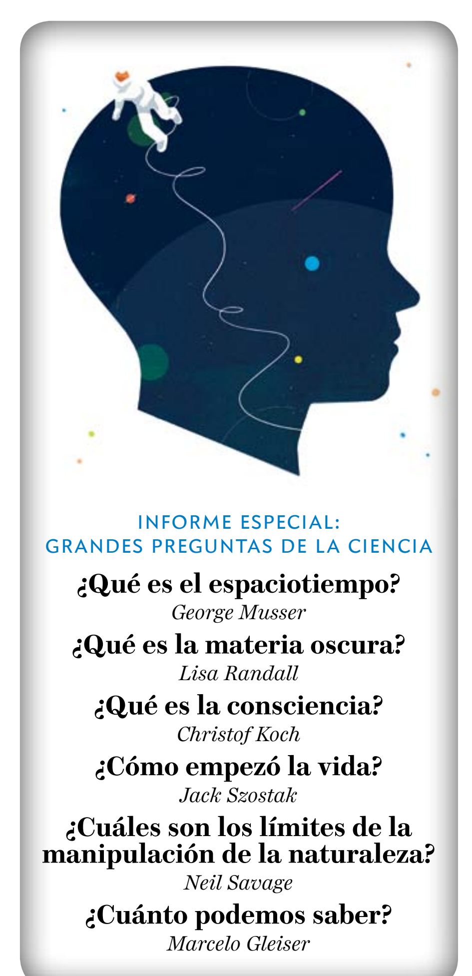


ARQUEOLOGÍA

Cómo cambiaron el mundo los prisioneros

Catherine M. Cameron

A lo largo de la historia, los cautivos, en su mayoría mujeres y niños, constituyeron un motor de avance para la evolución de la sociedad moderna.



INFORME ESPECIAL: GRANDES PREGUNTAS DE LA CIENCIA

¿Qué es el espaciotiempo?

George Musser

¿Qué es la materia oscura?

Lisa Randall

¿Qué es la consciencia?

Christof Koch

¿Cómo empezó la vida?

Jack Szostak

¿Cuáles son los límites de la manipulación de la naturaleza?

Neil Savage

¿Cuánto podemos saber?

Marcelo Gleiser

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Javier Grande: *Apuntes*; *Mensajeros celestes* y *Los planetarios y el nacimiento de la ciencia como espectáculo*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *La paradoja de la conservación de la biodiversidad*; José Óscar Hernández Sendín: *La clave olvidada en el problema de la reproducibilidad*; Carlos Lorenzo: *El inesperado triunfo de los dinosaurios*; Anna Romero Ibáñez: *Las flores, como las ve una abeja*; Sixto Castro: *¿Está la neurociencia limitada por las herramientas o por las ideas?*; Elisa Vilaret: *Enfermedades emergentes en un mundo cambiante*, *Epidemias que varían con el clima*, *Las infecciones en cifras*, *Un sinfín de problemas*, *El futuro de la vacuna contra la gripe* y *La desigualdad de las vacunas*; Carlos Olalla: *Prever la próxima pandemia*; Fabio Teixidó: *¿Compensa la minería en aguas profundas?*; J. Vilardell: *Despegues en caliente* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España